МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

Ю.И. Колесник, Р.С. Томашевский

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И СОГЛАСОВАНИЯ СИГНАЛОВ

Текст лекций

Утверждено
редакционно-издательским
советом университета,
протокол № 2 от 25.06.2015 г.

Харьков
НТУ «ХПИ»
2016

УДК 617 + 615.47,62-507
ББК 54.5
К60

Рецензенты:
В. В. Замаруев, канд. техн. наук, профессор кафедры промышленной и биомедицинской электроники НТУ «ХПИ».
Е. Л. Ноздрачова, канд. техн. наук, доцент кафедры приборов и методов неразрушающего контроля НТУ «ХПИ».

Викладаються основи теорії вимірювань неелектричних фізичних величин, особливості їх обробки та передачі для використання у автоматичних системах керування.

Призначено для студентів спеціальностей 7.05080202 «Електронні системи» та 8.05080101 «Мікро - та наноелектронні прилади та пристрої».

Колесник Ю. И.
К60 Электронные устройства измерения и согласования сигналов: Текстт лекций / Ю. И. Колесник, Р. С. Томашевский. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – 130 с.

Излагаются основы теории измерений неэлектрических физических величин, особенности их обработки и передачи для использования в автоматических системах управления.

Предназначено для студентов специальности 7.05080202 «Електронные системы» и 8.05080101 «Микро - и наноэлектронные приборы и устройства»

Ил. 97. Библиогр. 11 наим.

УДК 617 + 615.47,62-507
ББК 54.5

© Колесник Ю. И.,
Томашевский Р. С., 2016.
© НТУ «ХПИ», 2016.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших элементов системы автоматического контроля и регулирования является датчик – первичный измерительный преобразователь информации, преобразующий измеряемый параметр в сигнал, удобный для передачи, хранения, регистрации и дальнейшего преобразования.

Огромное разнообразие технологических процессов приводит к необходимости иметь в наличии широкий выбор датчиков, реагирующих на самые различные физические факторы.

Специфические условия работы датчиков, часто находящихся в непосредственном контакте с объектом регулирования, заставляют выбирать из всех возможных принципиальных решений и конструкций только те, которые удовлетворяют необходимым эксплуатационным требованиям – прочности, надежности, стойкости к действию окружающей среды и т.д.

Кроме того, датчики должны удовлетворять общим требованиям, характерным для устройств автоматики, а именно иметь: быстродействие, высокую чувствительность и точность, стабильность характеристик, сопротивляемость влиянию различных внешних факторов. Поэтому знания основ принципа действия, основных характеристик и параметров, конструктивных особенностей и практического применения различных датчиков являются необходимыми для специалиста в области электронных систем.

В данном пособии собраны расширенные и отредактированные лекции, которые в течение последних лет читаются доцентами Ю.И. Колесником и Р.С. Томашевским студентам дневной и заочной формы обучения, изучающим дисциплину «Электронные устройства измерения и согласования сигналов» на кафедрах «Промышленная и биомедицинская электроника» и «Физическое материаловедение для электроники и гелиоэнергетики» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Содержание дисциплины «Электронные устройства измерения и согласования сигналов» соответствует учебному плану подготовки бакалавров направления 6.050802 «Электронные системы» высших учебных заведений и кафедр IV уровня аккредитации.

В заключение авторы выражают благодарность инженеру-программисту лаборатории биомедицинской электроники А.Н. Носуле за проделанную работу по оформлению текста лекций.

Искреннюю признательность и благодарность авторы выражают рецензентам – к.т.н., профессору В.В. Замаруеву и к.т.н., доценту Е.Л. Ноздрачовой за полезные замечания и предложения, учтенные при редактировании пособия.

Лекция 1. ОСНОВЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

1.1. *Введение в дисциплину*.
1.2. *Основные характеристики и параметры датчиков*.
1.3. *Погрешности первичных преобразователей*.

1.1. Введение в дисциплину

Под термином *«информация»* принято понимать сведения или совокупность сведений о каком-либо объекте. Информация является отображением существа материального мира, свойств физических объектов в виде физических величин. Количественная информация о свойствах физических объектов (информация о числовых значениях физических величин), получаемая в результате измерений, носит название *измерительной информации*.

Материальным носителем измерительной информации является *измерительный сигнал*. *Входной измерительный сигнал*, т. е. сигнал, воздействующий на вход средства измерения (преобразователь, прибор или система), является в большинстве случаев физическим процессом, параметры которого – та или иная функция времени. Измеряемая же *величина* – это определенное свойство или определенный параметр этого процесса. Поэтому различают понятия измерительного сигнала и измеряемой величины. Физический процесс может обладать многими параметрами, но в каждом конкретном случае нас интересуют определенный параметр этого процесса, какая-то одна физическая величина.

Параметр входного сигнала, который является измеряемой величиной либо функционально связан с ней, называют *информативным параметром*.

Выходным называют сигнал, возникающий на выходе средства измерений. В большинстве случаев выходным сигналом также является некоторый физический процесс, который может характеризоваться многими параметрами.

Информативный параметр выходного сигнала – это параметр выходного сигнала, однозначно функционально связанный с информативным параметром входного сигнала.

Измерительное преобразование – это преобразование с заданной точностью входного измерительного сигнала в функционально связанный с ним выходной сигнал. Рассматриваемый процесс зачастую реализуется путем преобразования сигналов одной физической природы в сигнал иной физической природы. Физической основой измерительного преобразователя является

преобразование и передача энергии. Элемент цепи измерительного преобразования, на который воздействует преобразуемая величина, называется *чувствительным элементом*.

Измерительный преобразователь как средство измерений является преобразователем его входного измерительного сигнала в выходной сигнал, более удобный для дальнейшего преобразования, передачи, обработки вычислительными устройствами или хранения, но непригодный для непосредственного восприятия наблюдателем.

В общем, выходной сигнал измерительного преобразователя формируется под воздействием не только информативного параметра входного сигнала, но и многих других параметров, как измерительного сигнала, так и окружающей среды, например, температуры, влажности, внешних и внутренних помех и т. п. В условиях воздействия указанных факторов измерительный преобразователь должен быть максимально чувствительным к измеряемой величине (информативному параметру входного сигнала) и очень незначительно реагировать на влияющие факторы (неинформативные параметры).

Неинформативным называют параметр входного сигнала, который функционально с измеряемой величиной не связан. Такой параметр может оказывать воздействие на средство измерения и быть источником погрешности. Так, при измерении амплитуды гармонического сигнала неинформативным параметром является частота.

Датчик – конструктивно завершенное устройство, преобразующее измеряемую величину в сигнал, удобный для передачи, хранения, дальнейшего преобразования, регистрации. Нужно отметить, что в состав датчика может входить ряд измерительных преобразователей.

Измерительные преобразователи, включенные первыми в последовательную цепь измерительных преобразований, называются *первичными*.

Наличие датчика дает возможность реализовать важные особенности современных методов измерений и автоматизированных систем управления, в частности преобразование одних физических величин в другие величины (обычно – электрические), последующие преобразования, хранение и использование; дистанционность измерительных преобразований.

Целью дисциплины является изучение физических основ, принципа действия, основных параметров и характеристик, а также практического применения различных датчиков, которые дают информацию о состоянии реальных физических объектов.

Существуют несколько классификаций всего многообразия датчиков по различным критериям.

По типу преобразуемой величины датчики делятся на:

– неэлектрическую в неэлектрическую величину;
– электрическую в электрическую величину;
– неэлектрическую в электрическую величину.

Значительное место в современных системах автоматизации и измерения приходится на преобразование разнообразных неэлектрических величин (температуры, давления, расстояний и т.д.) в электрические (напряжение, ток и т.д.), поэтому в данном курсе преимущественно будет рассматриваться последний тип датчиков.

По *характеру выходного сигнала* различают датчики непрерывного (аналогового) и дискретного вида.

По способу преобразования измеряемой величины датчики могут быть классифицированы на:

– параметрические (изменение входного сигнала вызывает соответствующее изменение какого-либо параметра электрической цепи);

– генераторные (изменение входного сигнала вызывает появление электрической энергии, функционально зависящей от входного сигнала).

В генераторных датчиках энергия выходного сигнала обеспечивается только за счёт энергии входного сигнала. Параметрические датчики требуют дополнительного источника энергии. Входной сигнал лишь управляет передачей энергии этого источника в нагрузку или систему преобразования.

По типу первичного преобразователя можно выделить следующие основные группы датчиков:

– резистивные;
– емкостные;
– индуктивные;
– пьезоэлектрические и т.д.

Отдельно следует отметить ряд датчиков, работающих на основе специфических свойств. Это, прежде всего, волоконно-оптические датчики, датчики на эффекте Холла.

Большое значение датчики играют в современной медицине. Здесь измеряют вес, температуру, функциональные показатели деятельности сердечно-сосудистой и дыхательной систем, параметры движения крови и т.д.

1.2. Основные характеристики и параметры датчиков

1.2.1. Статические характеристики

Статические характеристики датчика в полной мере могут быть описаны *функцией преобразования*, которая представляет собой зависимость выходной величины (Y) от входной (X) (рис. 1.1).

На практике предпочитают использовать преобразователи с линейными характеристиками. Нелинейность возникает из-за свойств первичных преобразователей: наличие в них насыщения, зоны нечувствительности, неоднородности магнитного поля и т.д. Характеристика ограничена нижними (X_{min}, Y_{min}) и верхними (X_{max}, Y_{max}) значениями входной и выходной величин.

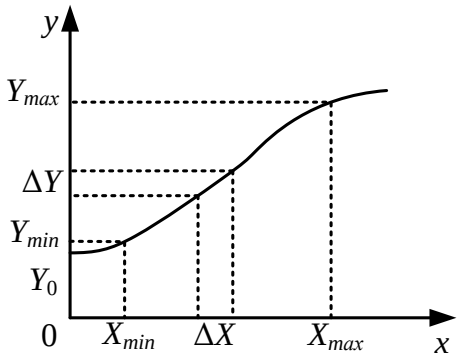


Рисунок 1.1 – Функция преобразования датчика

В случае нелинейности датчика обычно применяют аппроксимацию зависимости (кусочно-линейную или полиномом невысокого порядка), табличное описание функции преобразования или специальные методы линеаризации.

Различают *номинальную* функцию преобразования, которая описывает усредненные статические свойства партии или серии датчиков и *индивидуальную*, которая может быть получена только путем калибровки конкретного изделия.

Следует помнить, что только функция преобразования полностью описывает статические свойства датчиков, и из нее могут быть определены основные статические характеристики, которые зачастую приводят в сопроводительной документации. Среди таких характеристик можно отметить:

а) *Чувствительность* – предел отношения приращений выходной и измеряемой величин:

$$S = \lim \frac{\Delta Y}{\Delta X}. \qquad (1.1)$$

б) *Коэффициент преобразования* K – отношение значения выходной величины к соответствующему значению входной величины:

$$K = \frac{Y}{X}. \qquad (1.2)$$

У датчиков с линейной статической характеристикой значения чувствительности и коэффициентом преобразования равны. Нелинейные характеристики с определённой степенью приближения можно заменить линейными.

в) *Диапазоны изменения входной и выходной величины*.

Показывает рабочий диапазон датчика. Ограничен (X_{min} и X_{max} – по входной величине, Y_{min} и Y_{max} – по выходной).

Обычно при $X = 0$, $Y \neq 0$. Значение Y в этом случае называется *остаточным сигналом.* Это отрицательный фактор, т.к. в области малых входных сигналов чувствительность резко падает.

г) *Порог чувствительности* – минимальное значение входной величины, которая вызывает изменение выходной величины.

1.2.2. Динамические характеристики

Динамическими называют такие характеристики датчика, которые проявляются только при преобразовании переменных во времени величин. Основной характеристикой, описывающей работу датчика в таких режимах, является дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, так называемая *передаточная функция.* Для анализа передаточной функции используют преобразование по Лапласу, и она может быть записана в виде:

$$(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + 1) y = k(b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \ldots + 1) x, \qquad (1.3)$$

где k – статическая чувствительность или коэффициент преобразования:

При медленно изменяющихся сигналах получаем из (1.3):

$$y(t) = y(0) + kx(t); \qquad (1.4)$$

На практике решение (1.3) находят при определенных типовых воздействиях $x(t)$ и начальном значении $y(0)$.

а) *Единичное ступенчатое воздействие функцией* $1(t)$ (рис. 1.2):

$$1(t) = 0 \text{ при } t < 0, \text{ и } 1(t) = 1 \text{ при } t \geq 0$$

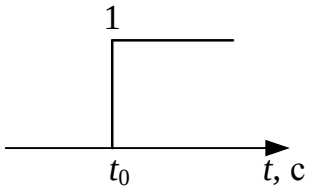


Рисунок 1.2 – Временная диаграмма единичного ступенчатого воздействия

Реакция на единичную ступенчатую функцию 1(t) называется *переходной характеристикой.*

б) *Воздействие единичной импульсной функцией* $\delta(t)$ (рис. 1.3). Это импульс бесконечно большой амплитуды и бесконечно малой длительности. Площадь его всегда равна 1.

$$\delta(t) = 0 \text{ при } t \neq 0, \text{ и } \delta(t) = \infty \text{ при } t = 0.$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1 \tag{1.5}$$

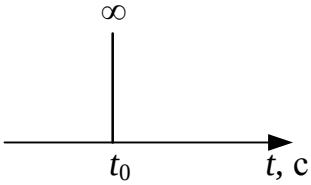


Рисунок 1.3 – Временная диаграмма δ - функции

Реакция на единичную импульсную функцию $\delta(t)$ называется *импульсной характеристикой.*

в) *Воздействие гармонической функцией*

$$x = X_m \cdot \sin[\omega t + \phi_1(\omega)], \tag{1.6}$$

где X_m – амплитуда входного сигнала, ω – угловая частота; $\phi_1(\omega)$ – начальная фаза.

Реакция на гармоническую функцию даёт изменение и амплитуды и фазы выходного сигнала. Получают *амплитудно-частотную* и *амплитудно-фазовую* характеристику преобразователя.

1.2.3. Основные структуры датчиков

Измерительное преобразование входной величины (X) в выходную величину (Y) может осуществляться в один или несколько этапов. При этом входной сигнал воздействует непосредственно на измерительный преобразователь, называемый *первичным*.

а) *Датчики с последовательным преобразованием.* Структура такого датчика имеет вид, представленный на рисунке 1.4.

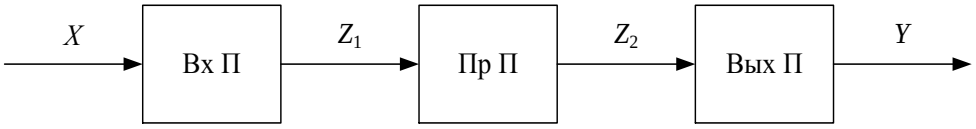


Рисунок 1.4 – Структура датчика с последовательным преобразованием
X – измеряемая (входная) величина; Вх П – входной (первичный) преобразователь; Пр П – промежуточный преобразователь; Вых П – выходной преобразователь; Z_1 и Z_2 – промежуточные величины; Y – выходная величина

При этом связь входной и выходной величины будет иметь вид:

$$Y = f(X). \tag{1.7}$$

б) *Дифференциальные датчики*. Реализация такого датчика имеет вид, представленный на рисунке 1.5.

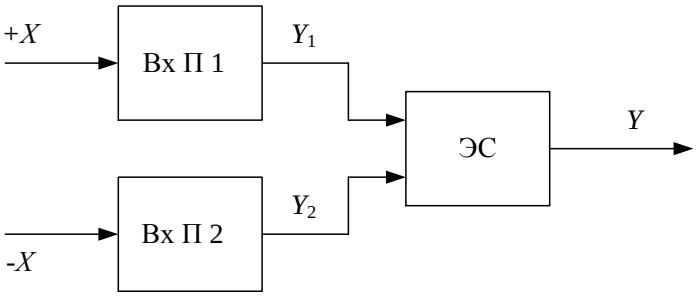


Рисунок 1.5 – Структура дифференциального датчика
Вх П – входной (первичный) преобразователь; ЭС – элемент сравнения

Два одинаковых датчика включены так, чтобы на входе возмущающие воздействия вычитались, а полезные сигналы суммировались.

$$Y = f(Y_1 - Y_2). \tag{1.8}$$

Эти датчики позволяют получать, например, температурную компенсацию (по примеру дифференциального усилителя).

в) *Компенсационные датчики* (рис. 1.6)

Является модификацией предыдущей схемы. В ней сравнивается измеряемая величина X с эталонной (образцовой) величиной. Например, мостовая схема измерения сопротивления (измерительный мост).

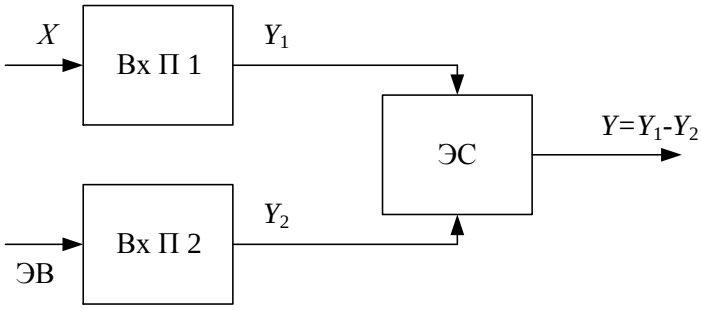


Рисунок 1.6 – Структура компенсационного датчика

1.3. Погрешности первичных преобразователей

Качество передачи информации о состоянии объекта характеризуют величиной допустимых погрешностей. Они классифицируются по ряду признаков.

По причине возникновения:

а) *Методические погрешности* определяют приближенный характер метода измерения. Например, прямо пропорциональной зависимостью $y = k \cdot x$ можно считать только при постоянном значении k. Если величина k даже незначительно изменится под воздействием каких-либо факторов, то зависимость $y = k \cdot x$ линейной можно считать только с некоторой погрешностью.

б) *Инструментальные погрешности* возникают из-за недостаточной точности изготовления и сборки датчиков. Эта погрешность зависит от качества материалов, наличия люфтов, трения и др. Эту погрешность ещё называют *технологической.*

Преобразователи работают в сложных изменяющихся во времени условиях. Поэтому $y(t)$ зависит и от эксплуатационных факторов (температуры, давления воздуха, вибраций, параметров цепей питания). Оговаривают условия, при которых работают ПП. Также условия называют *нормальными.*

В зависимости от условий возникновения погрешностей, различают:

а) *Основная погрешность* – это суммарная результирующая погрешность, возникающая в нормальных условиях.

б) *Дополнительная погрешность* – образуется при отклонении условий эксплуатации от нормальных.

В зависимости от степени неопределённости:

а) *Систематические погрешности* – не изменяются с течением времени. Они или имеют постоянное значение, или есть функцией некоторых величин (напряжения питания, температуры и т.п.).

б) *Прогрессирующие погрешности* – медленно изменяются с течением времени. Они вызваны процессом старения деталей машины.

в) *Случайные погрешности* – не определены по величине и времени проявления. Эти погрешности учитывают законами теории вероятностей.

По способу выражения:

а) *Абсолютная погрешность* – разность между полученным значением выходной величины Y' и расчётным (номинальным) её значением Y (рис. 1.7).

$$\Delta Y = Y' - Y\,. \qquad (1.9)$$

Абсолютная погрешность не есть мерой точности измерения параметра. Точность характеризуется относительной погрешностью.

б) *Относительная погрешность* – Y_0 отношение абсолютной погрешности ΔY к расчётному значению выходной величины Y. Она обычно выражается в % (в точке измерения).

$$Y_0 = (\Delta Y / Y) \cdot 100\,\% = \frac{Y' - Y}{Y} \cdot 100\,\%. \qquad (1.10)$$

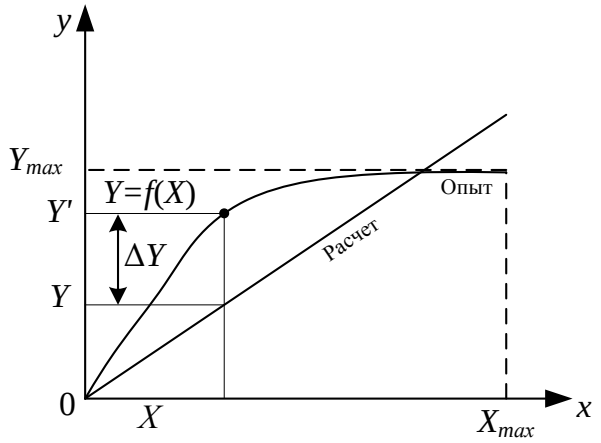


Рисунок 1.7 – К пояснению причины возникновения погрешности

Текущее значение относительной погрешности растет с уменьшением X и при $X \to 0$ оно стремится к бесконечности (т.к. $Y \to 0$).

в) *Приведенная погрешность* – Y_n отношение абсолютной погрешности к наибольшему значению выходной величины. Она выражается в процентах:

$$Y_n = \frac{\Delta Y}{Y_{max}} \cdot 100\,\%. \qquad (1.11)$$

Основной причиной возникновения статической погрешности является несоответствие номинальной функции преобразования действительной (рис. 1.7).

Перечисленные выше виды погрешностей могут наблюдаться в статическом режиме работы датчика, т.е. при стационарном входном сигнале.

При преобразовании переменных во времени измерительных величин у большинства датчиков появляется дополнительная *динамическая погрешность*. Такие погрешности обусловлены инерционными свойствами ИП и поэтому их значения зависят от скорости изменения преобразуемой величины.

Лекция 2. РЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

2.1. *Общие сведения.*
2.2. *Основные схемы подключения.*
2.3. *Потенциометрические датчики.*
2.4. *Тензорезисторные датчики.*
2.5. *Терморезисторы.*
2.6. *Магниторезисторы.*

2.1. Общие сведения

Резистивные датчики изменяют свое *активное электрическое сопротивление* под действием измеряемой величины. В общем случае активное сопротивление чувствительного элемента может быть определено по выражению:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \qquad (2.1)$$

где ρ – удельное сопротивление материала, S – площадь поперечного сечения, l – длинна проводника.

В зависимости от вида входной величины резистивные ПП делятся на:

- потенциометрические,
- тензорезисторы,
- терморезисторы,
- магниторезисторы.

2.2. Основные схемы подключения

В виду широкого спектра функционального назначения резистивных датчиков, а также большого количества промышленных приложений их использования, в настоящее время существует большое количество схем подключения таких датчиков, имеющих свои сферы применения.

а) *Четырехпроводная схема* (схема Кельвина). Используется в случае необходимости измерения абсолютного значения контролируемого параметра, особенно на значительных расстояниях.

Подключение производится по схеме, изображенной на рис. 2.1.

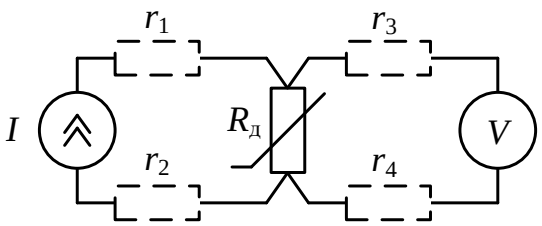


Рисунок 2.1 – Четырехпроводная схема подключения резистивного датчика

В приведенной схеме цепь питания датчика $R_д$ (источник I) отделена от измерительной цепи. Такой подход позволяет исключить влияние активного сопротивления соединительных проводов r_1-r_4, а именно цепи питания датчика, что особенно важно для резистивных датчиков с малыми значениями омического сопротивления. Падение напряжения определяется непосредственно на измерительном элементе (исключая r_1 и r_2). Сопротивление же r_3 и r_4 можно не учитывать в силу того, что сопротивление вольтметра V существенно больше.

Существуют конструкции датчиков, имеющие четыре вывода: два измерительных и два питания. В таких конструкциях исключено влияние омического сопротивления контактов.

В качестве выходных преобразователей при подключении резистивных датчиков могут быть использованы схемы на операционных усилителях, например схема дифференциального усилителя (рис. 2.2).

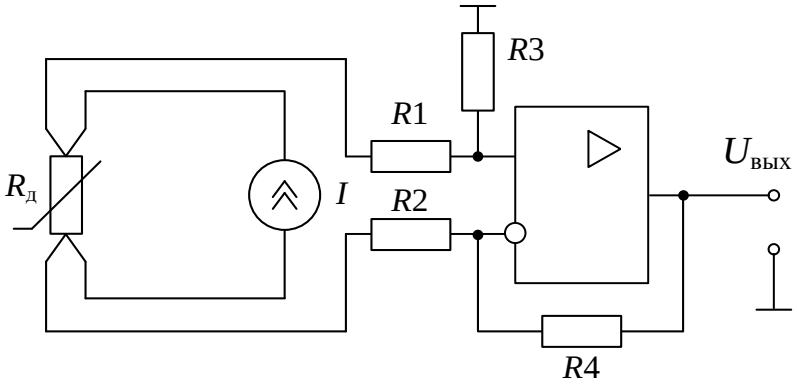


Рисунок 2.2 – Подключение резистивного датчика к дифференциальному усилителю

б) *Полумостовая схема* (делитель напряжения) (рис. 2.3) используется в устройствах в случае, когда объект измерения находится в непосредственной близости от системы управления и цепи измерения.

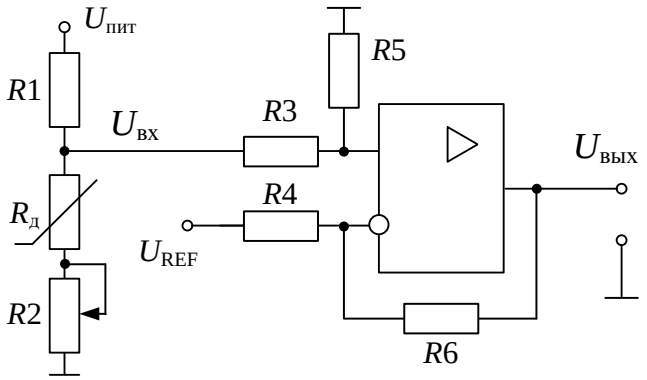


Рисунок 2.3 – Полумостовая схема подключения резистивного датчика

Данная схема характеризуется невысокой чувствительностью (вследствие малого диапазона изменения $U_{вх}$), простотой конструкции, легкостью настройки. Напряжением сравнения U_{REF} можно задать условно «нулевой уровень» сигнала.

в) *Мостовая схема*. Такие схемы используются в случаях, когда необходимо контролировать малые изменения измеряемой величины.

Используются схемы *одинарного* (рис. 2.4) и *двойного* моста (рис. 2.5).

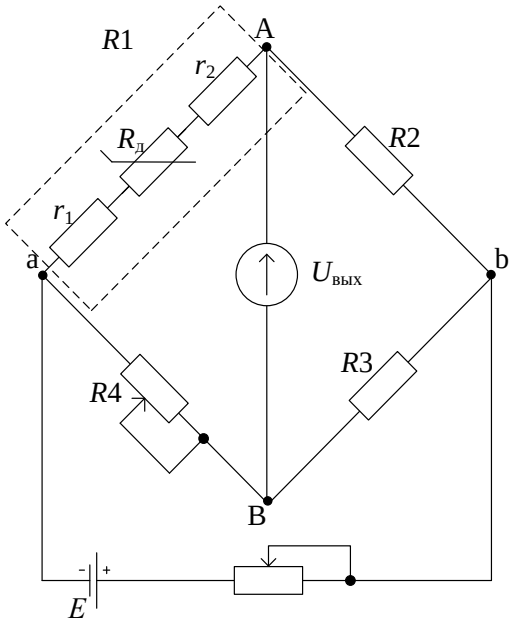


Рисунок 2.4 – Эквивалентная схема одинарного моста

В состав одинарного моста входит 4 резистора $R1$ – $R4$, которые называют плечами моста, а точки их соединений – вершины моста. На схеме сопротивление $R1$ представлено в виде последовательного соединения резистивного преобразователя и сопротивлений соединительных проводов r_1 и r_2.

Различают измерительную диагональ питания a-b и индикаторную диагональ A–B. Разность напряжения U_A – U_B равна нулю при условии $R1 \cdot R3 = R2 \cdot R4$ (условие равновесия моста). Если одно плечо неизвестно, то

$$R1 = R4 \frac{R2}{R3}. \qquad (2.2)$$

Также у одинарного моста различают два плеча:

– $R1$ и $R4$ называют «плечо сравнения»
– $R2$ и $R3$ называют «плечо отношения».

Плечо сравнения изготавливают в виде многодекадного *магазина сопротивлений*. При измерениях чувствительность существенно снижается сопротивлением проводов соединений r_1 и r_2. В связи с этим одинарный

мост может быть использован для измерений сопротивлений $R_д$ от 10^{-3} Ом. Верхний предел составляет 10^5 Ом.

Указанный выше недостаток может быть устранен в схеме двойного моста (рис.2.5). Нижний предел измерений в таких устройствах составляет $100…10^{-8}$ Ом.

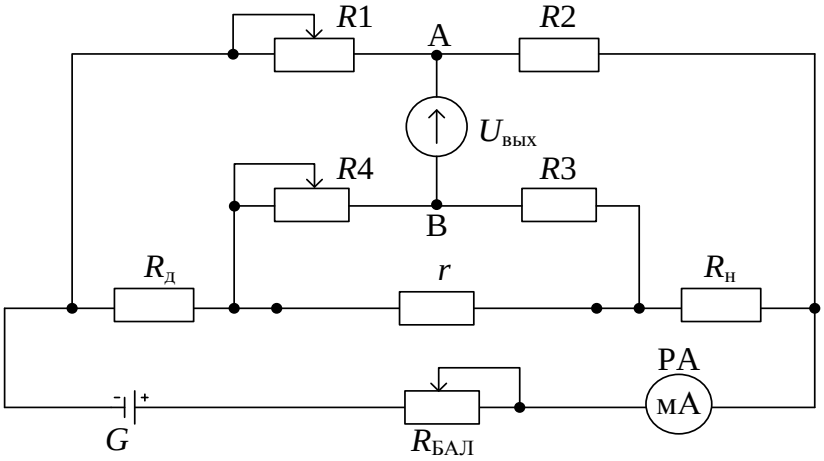


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема двойного измерительного моста

$$R_д = R_н \frac{R1}{R2} + d \approx R_н \frac{R1}{R2}. \qquad (2.3)$$

Условие $d = 0$ обеспечивается равенством $\frac{R1}{R2} = \frac{R4}{R3}$.

Для компенсации сопротивления соединительных проводов r выбирают: $R1 = R4$ и $R2 = R3$.

Особенность схемы состоит в том, что можно измерять малые сопротивления при больших токах.

Измерительные мосты могут быть включены в электронную схему с операционными усилителями (рис. 2.6).

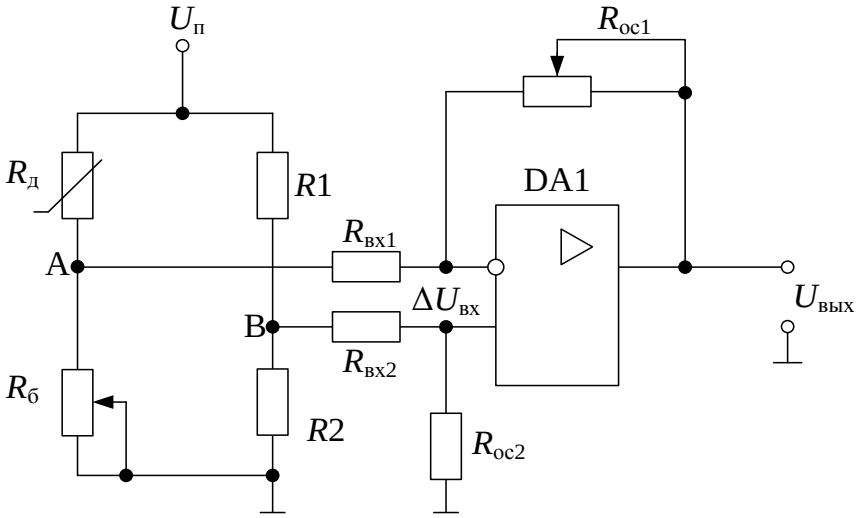


Рисунок 2.6 – Схема измерения на основе моста и дифференциального усилителя

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_{\text{ос1}}}{R_{\text{вх1}}} U_{\text{А}} + \frac{R_{\text{ос2}}}{R_{\text{вх2}}} U_{\text{В}}. \qquad (2.4)$$

При условии $R_{\text{вх1}} = R_{\text{вх2}}$ и $R_{\text{ос1}} = R_{\text{ос2}}$ выражение (2.4) можно записать в виде:

$$U_{\text{вых}} = -(U_{\text{В}} - U_{\text{А}}) \cdot \frac{R_{\text{ос}}}{R} = -\Delta U_{\text{вх}} \cdot \frac{R_{\text{ос}}}{R}. \qquad (2.5)$$

Недостатком такой схемы будет являться погрешность, обусловленная входными токами дифференциального усилителя. Для устранения этого недостатка может быть использованием инструментальный усилитель.

2.3. Потенциометрические датчики

Такие датчики предназначены для измерения угловых или линейных перемещений. Они представляют собой переменный резистор, один из контактов которого перемещается. На электрической схеме они обозначаются так, как представлено на рис. 2.7.

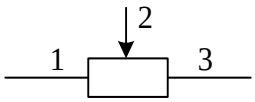


Рисунок 2.7 – Обозначение потенциометра

Величина сопротивления резистора зависит от положения подвижного контакта. Потенциометрические датчики служат для преобразования механических перемещений в соответствующие изменения тока или напряжения.

В промышленности широко используются проволочные потенциометрические преобразователи непрерывной намотки. Такой преобразователь состоит из каркаса, обмотки и подвижного токосъемного контакта в виде *щетки*, которая скользит по обмотке. В месте скольжения изоляция на проводах обмотки отсутствует.

Каркас изготавливают из диэлектрика или металла, покрытого слоем диэлектрика. По форме каркас бывает плоский, цилиндрический или кольцевой.

В качестве материала проводов обмотки берут сплавы с высоким удельным сопротивлением: манганин, константан, нихром.

Манганин: ~ 85% Cu; ~ 2% Ni; ~ 12% Mn; ~ 1% Fe, ρ = 0,42 – 2,08 Ом·м

Константан: ~ 60% Cu; ~ 40% Ni, ρ = 0,48 Ом·м

Нихром: Ni – 60%; Cr – 12%; Fe – 26%; Mn – 2%. ρ = 1,1 – 1,2 Ом·м

Если по техническим условиям требуется повышенная износостойкость или контактное давление щетки мало, используют сплавы: платины с иридием, платины с палладием и др.

Выходная характеристика ПП может быть линейной и нелинейной. Нелинейность достигается специальным видом намотки: неоднородность намотки; намотка на фигурный каркас.

Конструкция кольцевого ПП представлена на рис. 2.8, а его электрическая схема на рис. 2.9.

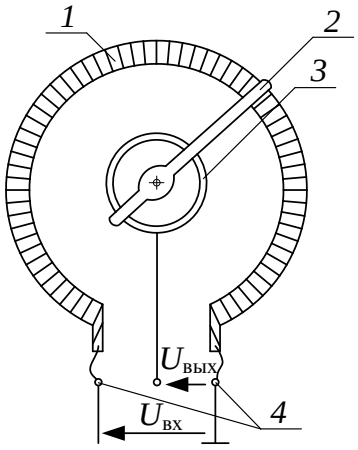


Рисунок 2.8 – Кольцевой потенциометрический преобразователь:
1 – обмотка резистора; *2* – щетка с двумя контактами;
3 – токосъемное кольцо; *4* – внешние выводы

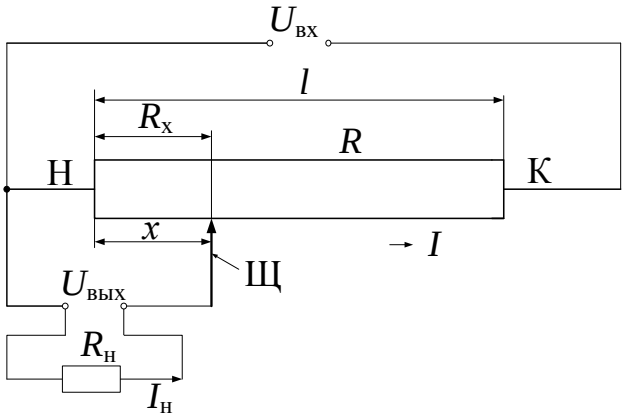


Рисунок 2.9 – Электрическая схема датчика:
Н – начало; К – конец; Щ – щетка;
$U_{вх}$ – напряжение питания (постоянное или переменное)

Сопротивление R_x между началом и щеткой меняется по закону:

$$R_x = \frac{R \cdot x}{l}, \qquad (2.6)$$

где R – полное сопротивление потенциометра, x – положение щетки относительно начала, l – длина проводника.

При холостом ходе имеется зависимость:

$$U_{\text{вых.х.х.}} = \frac{U_{\text{х}}}{R} \cdot R_{\text{х}}. \tag{2.7}$$

С нагрузкой характеристика становится нелинейной.

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot R_{\text{х}} \cdot R_{\text{н}}}{R \cdot R_{\text{н}} + R \cdot R_{\text{х}} - R_{\text{х}}^{2}}, \tag{2.8}$$

при $x = 0$ имеем $R_{\text{х}} = 0$, $U_{\text{вых}} = 0$;

при $x = l$ имеем $R_{\text{х}} = R$, $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$.

Отсюда следует что, чем меньше сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, тем больше нелинейность.

На практике стараются соблюдать условие:

$$R_{\text{н}} = (100 \div 1000) \cdot R. \tag{2.9}$$

Характеристика реального проволочного потенциометра имеет ступенчатый характер из-за дискретного изменения сопротивления при переходе от витка к витку. При этом ошибка составляет:

$$\Delta U = \frac{U}{2\omega}, \tag{2.10}$$

где ω – полное число витков.

Для снижения ошибки уменьшают диаметр провода и увеличивают число витков, что, в свою очередь, ведет к росту сопротивления.

Для измерения перемещений двух знаков используют реверсивный потенциометр (рис. 2.10 и 2.11).

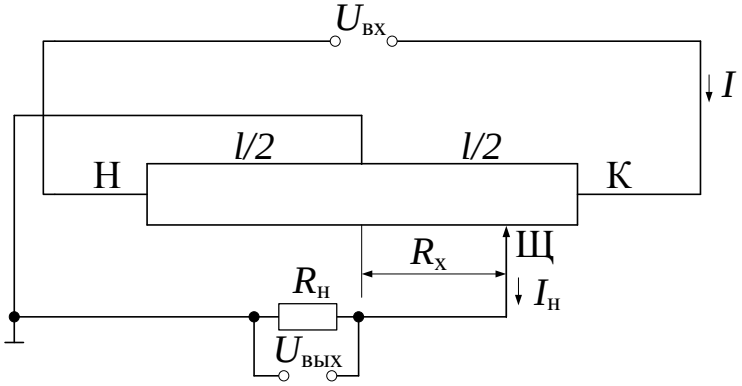


Рисунок 2.10 – Реверсивный потенциометр

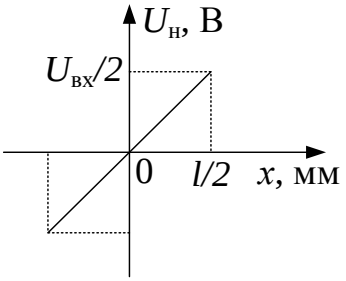


Рисунок 2.11 – Функция преобразования реверсивного потенциометра

В конструкции реверсивного потенциометра имеется вывод из точки *l/2*. От этой точки отсчитывается перемещение щетки. При изменении направления перемещения от *0* точки меняется знак выходного напряжения. Эта характеристика линейна при $R_Н = \infty$ (холостой ход).

Достоинства потенциометрических датчиков: малые габариты и масса, простота конструкции, возможность работы на постоянном и переменном напряжении.

Недостатки: влияние нагрузки на линейность функции преобразования.

2.4. Тензорезисторные датчики

Принцип действия тензорезисторов основан на изменении электрического сопротивления при изменении длины *l*, сечения *S* или удельного сопротивления *ρ* резистора под действием внешнего усилия.

Такие датчики предназначены для измерения деформаций, возникающих под действием внешних сил. Принцип действия основан на тензоэффекте. При приложении к проводнику (полупроводнику) внешней силы, происходит его деформация как в направлении действия этой силы, так и в перпендикулярном направлении. При этом изменяется активное сопротивление датчика.

На электрической схеме они обозначаются так, как представлено на рис. 2.12.

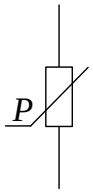


Рисунок 2.12 – Обозначение тензорезистора на схеме

Деформация в направлении действия силы происходит по закону Гука:

$$\delta_L = \frac{\Delta L}{L} = \frac{G}{E}, \qquad (2.11)$$

где δ_L – относительная продольная деформация; G – механическое напряжение в проводнике; L – длина проводника; ΔL – изменение длины в результате деформации; E – модуль упругости (*модуль Юнга*).

Тензоэффект характеризуется *коэффициентом тензочувствительности*:

$$K_{\text{т}} = \frac{\delta_R}{\delta_L} = 1 + 2\mu + m \approx 2, \qquad (2.12)$$

где μ – коэффициент Пуассона: $\mu = \frac{\Delta d}{d_0}\frac{L_0}{\Delta L}$; L – длина тела; d – поперечный размер; d_0 – начальная толщина; L_0 – начальная длина; Δd – изменение толщины; ΔL – изменение толщины; $m = \Delta\rho/\delta_L \cdot \rho$ – учитывает изменение удельного сопротивления материала проводника; δ_R – относительное изменение сопротивления.

Для металлов $K_{\text{т}}$ близок к 2.

Приращение сопротивления для проволочных тензорезисторов может быть рассчитано по формуле:

$$\Delta R = K_{\text{т}} \cdot R \cdot \delta_L. \qquad (2.13)$$

Обычно для изготовления проволочных тензорезисторов используют *константан.* У этих датчиков в широком диапазоне температур и механических напряжений сохраняется почти линейная зависимость между деформацией и изменением сопротивления.

Тензорезисторы делят на *проволочные* и *фольговые.*

Конструкция проволочных тензорезисторов представляет собой тонкую тензочувствительную проволоку, зигзагообразно уложенную между изоляционными подложками (рис. 2.13, *а*). Проволока диаметром 0,01 - 0,05 мм уложена зигзагообразно на подложку, которая представляет собой полимерный слой пленки. Сопротивление датчика 10 – 1000 Ом.

Фольговые тензорезисторы (рис. 2.13, *б*) делают из фольги толщиной 0,004-0,012 мм. Такой метод позволяет создать любой рисунок резистора. Подобные конструкции имеют большую площадь охлаждения, вследствие чего возможна подача больших токов (десятки мА) и существенное повышение чувствительности.

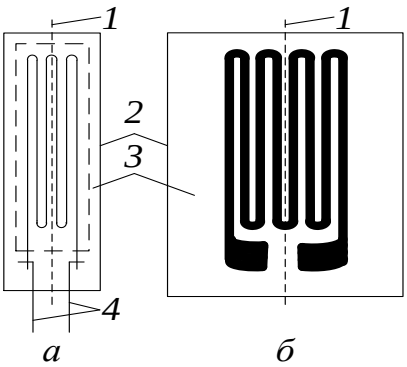


Рисунок 2.13 – Тензорезисторы: *а* – проволочный; *б* – фольговый;
1 – ось деформации; *2* – клей; *3* – бумага; *4* – выводы

При измерениях деформации резистор наклеивают на поверхность детали так, чтобы его ось совпадала с направлением деформации.

Приведенные конструкции являются датчиками разового действия, так как по условиям эксплуатации они приклеиваются на контролируемый объект. Изготавливаются тензодатчики и из полупроводниковых материалов.

Достоинства тензометрических датчиков: малые габариты, высокая чувствительность.

Недостаток: разброс параметров в одной партии достигает 20 %.

2.5. Терморезисторы

Принцип действия основан на изменении сопротивления проводника и полупроводника при изменении их температуры. Используют материалы, имеющие стабильную зависимость $R = f(T)$.

Такие датчики зачастую используются для измерения температуры сред, деталей, механизмов.

Приборы, имеющие линейную функцию преобразования, называют *термометрами сопротивления*. Такими свойствами обладают металлы – платина, медь, никель. Для повышения чувствительности применяют металлы с большим температурным коэффициентом сопротивления. Функция преобразования для этих металлов (с некоторыми допущениями) может быть записана в виде:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T), \qquad (2.14)$$

где R_0 – сопротивление при температуре 20 ºС; ΔT – превышение температуры относительно 20 ºС; α – температурный коэффициент сопротивления, зависит от вида материала.

Конструктивно термометр сопротивления представляет собой обмотку из тонкой проволоки на каркасе из диэлектрического термостойкого материала, вставленную в корпус с выводами.

Лучшие линейные зависимости имеют платиновые термометры сопротивления. На точность влияет старение, дополнительный нагрев из-за протекающего через датчик тока. Погрешность равна 0,5 ÷ 1 %.

Термисторы – изготавливаются из полупроводников. Это в основном окислы Mn, Cu, Fe, Ni, Co и других. Эти оксиды могут иметь отрицательный (NTC) или положительный (PTC) коэффициент сопротивления α, с ростом температуры сопротивление падает:

$$R_{\text{т}} = R_0 \cdot e^{\alpha \cdot \Delta T}. \qquad (2.15)$$

Функция преобразования (температурная характеристика) и вольт-амперная характеристика имеют вид, представленный на рис. 2.14.

Конструктивно термисторы представляют собой тело дисковой, шарообразной или произвольной формы с выводами. Для защиты от влаги их покрывают лаком или стеклом.

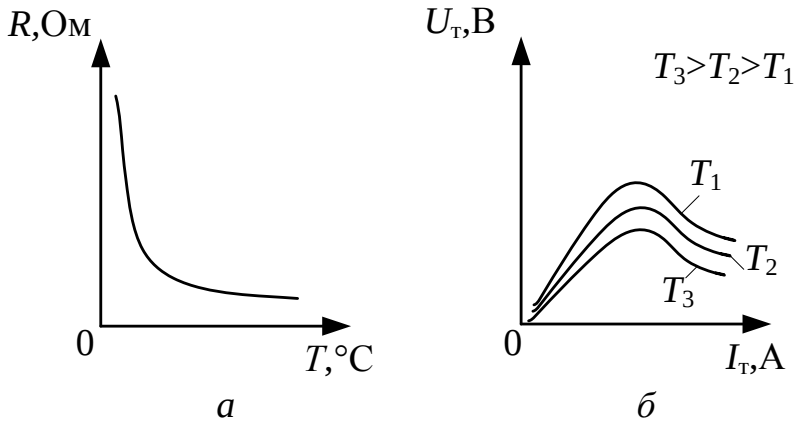


Рисунок 2.14 – Характеристики термистора:
а – температурная характеристика; *б* – вольт-амперная характеристика

Чувствительность термисторов в 5-10 раз больше, чем у термометров сопротивления. Однако они имеют нелинейную характеристику и работают в узком температурном диапазоне.

2.6. Магниторезисторы

Такими датчиками измеряют индукцию магнитного поля. Принцип действия основан на *эффекте Гаусса* (открыт в 1887 г.).

Эффект Гаусса (эффект магнитосопротивления) – это зависимость удельного сопротивления полупроводника от величины магнитного поля.

Магниторезистор управляется сигналом, гальванически не связанным с ним. Для изготовления используются материалы InAs, InSb (арсенид индия и антимонид индия). Начальное сопротивление большинства магниторезистора около 0,1÷0,2 Ом, однако, используются и номиналы до десятков Ом.

Основной характеристикой магниторезистора является зависимость сопротивления от индукции магнитного поля $R = f(B)$ (рис. 2.15).

При малых индукциях до 0,5 Тл:

$$R_{в} = R_0 + \alpha \cdot B^2, \qquad (2.16)$$

где $R_{в}$ – текущее значение сопротивления; R_0 – сопротивление при B = 0; α – коэффициент пропорциональности.

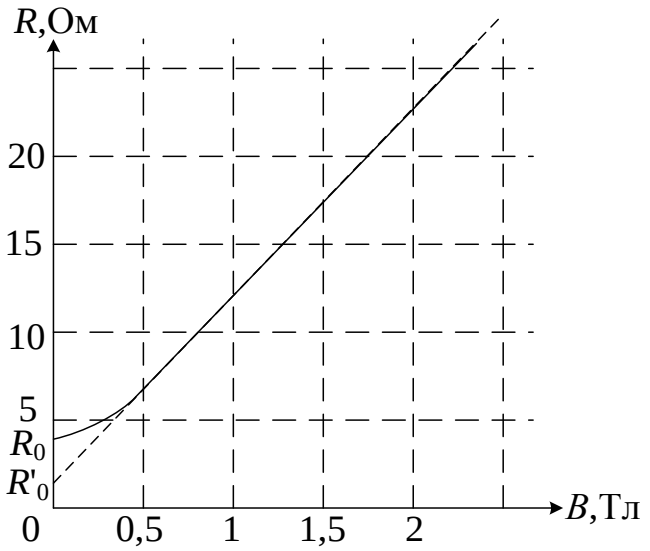


Рисунок 2.16 – Зависимость сопротивления магниторезистора от индукции

При большой индукции зависимость практически линейная > 0,5 Тл:

$$R_{в} = в \cdot B \pm R'_0, \qquad (2.17)$$

где $в$ – коэффициент пропорциональности; R'_0 – значение сопротивления на оси ординат, соответствующее продолжению прямой линии.

В качестве примера рассмотрим измерение скорости вращения какой-либо детали (рис. 2.16 и 2.17). Датчики включают по мостовой схеме во взаимно перпендикулярных плоскостях (А/В).

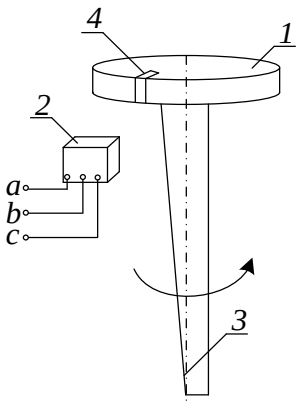


Рисунок 2.16 – Схема измерения скорости вращения объекта:
1 – диск на детали; *2* – датчик;
3 - ось вращения; *4* – магнит

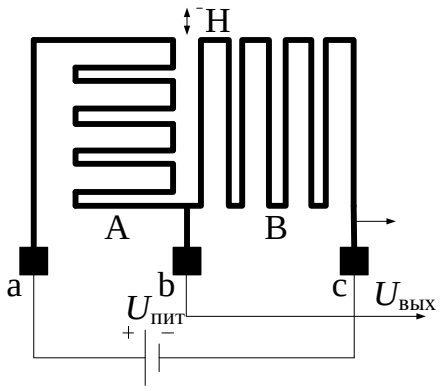


Рисунок 2.17 – Схема включения датчика

Магнит *4* при каждом обороте проходит мимо датчика, вызывая изменение его сопротивления. Это изменение схемой преобразуется в изменение напряжения U_A (рис. 2.18).

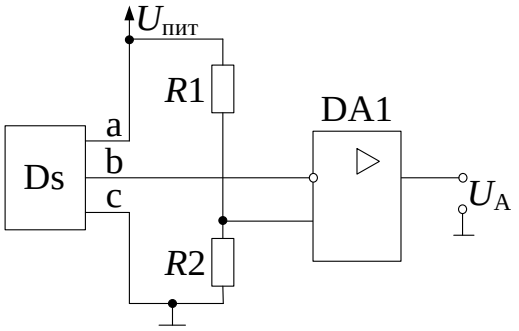


Рисунок 2.18 – Схема преобразования сигнала датчика в выходное напряжение

Рассмотренный датчик будет иметь характеристики, приведенные на рис. 2.19 – 2.21.

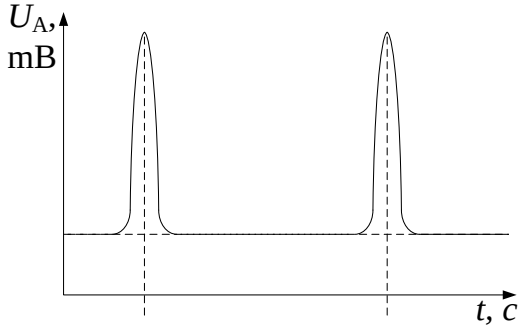


Рисунок 2.19 – Зависимость U_A от вращения оси объекта

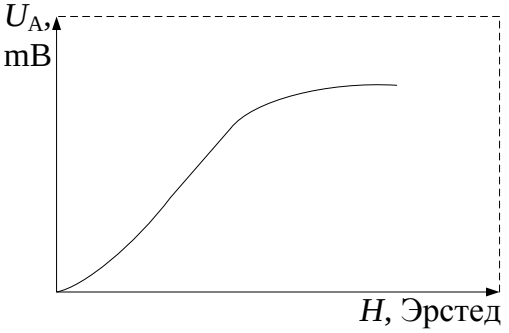


Рисунок 2.20 – Зависимость U_A от величины напряженности магнитного поля

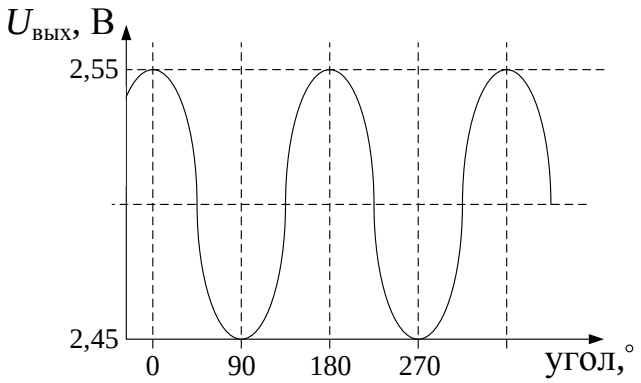


Рисунок 2.21 – Зависимость U_A от угла поворота оси вращения

Лекция 3. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ

3.1. *Общие сведения.*
3.2. *Схемы подключения.*
3.3. *Емкостной датчик уровня жидкости.*
3.4. *Емкостной датчик угла поворота.*
3.5. *Емкостной датчик влажности.*
3.6.*Емкостные преобразователи давления.*
3.7.*Емкостной датчик положения.*

3.1. Общие сведения

Принцип действия емкостных преобразователей основан на изменении емкости конденсатора под воздействием измеряемой величины:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{\delta}, \qquad (3.1)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость между обкладками; ε_0 – диэлектрическая постоянная, равная $8{,}854 \cdot 10^{-2}$Ф/м; S – площадь обкладки (при условии что обкладки одинаковые); δ – расстояние между обкладками.

Емкостные преобразователи служат для измерения перемещений, размеров деталей, уровня жидкости, влажности и т.д.

На рис. 3.1 – 3.3 показано устройство датчиков и графики изменения их емкости при изменении площади перекрытия пластин в результате смещения одной пластины относительно другой (рис. 3.1); изменения диэлектрической проницаемости ε (рис. 3.2); изменение расстояния между пластинами (рис. 3.3).

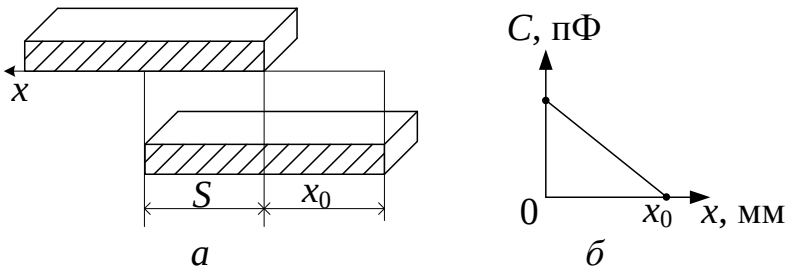


Рисунок 3.1 – Емкостной датчик, основанный на изменении площади перекрытия пластин: *а* – принцип действия; *б* – функция преобразования

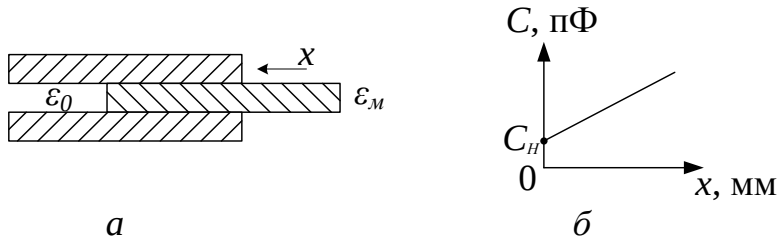


Рисунок 3.2 – Емкостной датчик, основанный на изменении диэлектрической проницаемости: *а* – принцип действия; *б* – функция преобразования

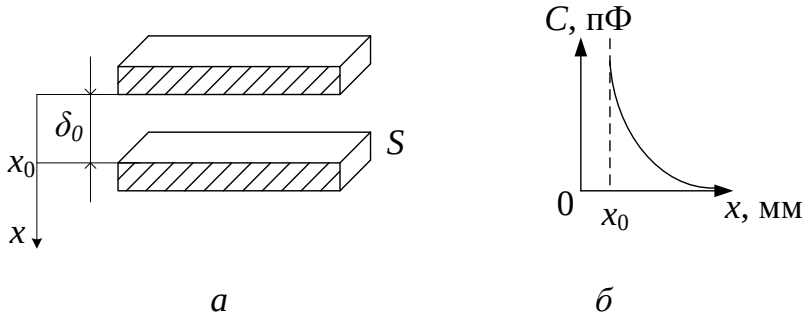


Рисунок 3.3 – Емкостной датчик, основанный на изменении расстояния между пластинами: *а* – принцип действия; *б* – функция преобразования

По способу исполнения все емкостные измерительные преобразователи можно разделить на одно- и двух- емкостные. Последние, в свою очередь бывают полудифференциальные и дифференциальные.

Одноемкостной датчик представляет собой один конденсатор переменной емкости.

Двухемкостной датчик представляет собой две емкости помещенные в один корпус. В случае полудифференциального – это эталонная и переменная емкость. В случае дифференциального – связанные переменные емкости (см. рис. 3.4).

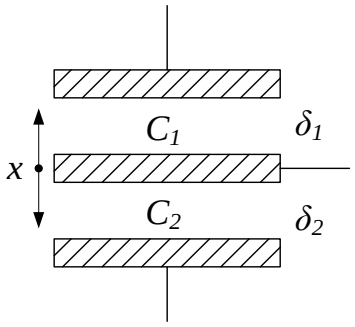


Рисунок 3.4 – Принцип действия дифференциального емкостного датчика

Дифференциальные датчики защищены от влияния внешних симметричных помех, однако более сложные в конструктивном исполнении.

Основные достоинства: высокая чувствительность, малые габариты и масса, технологическая простота изготовления.

Недостатки: необходимость усиления выходного сигнала и защиты от влияния паразитных емкостей.

3.2. Схемы подключения

1. *Мостовая схема*:

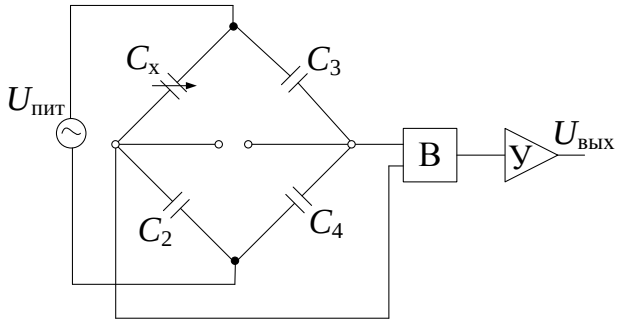


Рисунок 3.5 – Мостовая схема включения емкостного датчика

Такая схема работает по аналогии с измерительным резистивным мостом (рис. 3.5). Изменение емкости C_x чувствительного элемента приводит к изменению его реактивного сопротивления, а следовательно к разбалансу моста.

Схема питается переменным напряжением $U_{пит}$, поэтому выходное напряжение моста подается на выпрямитель (В), а затем на усилитель (У).

Очень часто такая схема выполняется внутри одного корпуса датчика с подключением напряжения питания и выходами измерительного сигнала.

Особенность: выходным сигналом схемы является аналоговый сигнал и информативным параметром – уровень (амплитуда).

2. *Времязадающая цепь*.

В такой схеме емкостной датчик включен во времязадающую цепь генератора (Г) (рис. 3.6). При этом информационным параметром такого датчика будут являться период следования T или длительность τ импульсов.

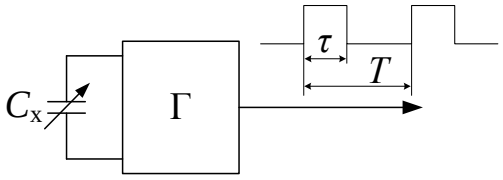


Рисунок 3.6 – Емкостной датчик в контуре с генератором

Преимуществом такой схемы включения является высокая точность измерения и возможность интеграции в цифровые схемы.

3. Подключение *дифференциального* датчика.

Такие датчики могут быть включены в мостовую схему (рис. 3.7). Одной из основных характеристик таких схем является высокая чувствительность и высокая устойчивость к внешним факторам. Такие схемы менее требовательны к стабильности источников питания.

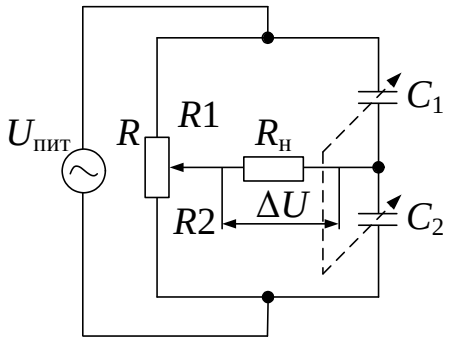


Рисунок 3.7 – Мостовая схема с емкостным дифференциальным датчиком

Для такой схемы справедливо отношение:

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_{C1}}{U_{C2}} = \frac{S_2 d_1}{S_1 d_2}. \qquad (3.2)$$

4. *Резонансный контур*.

В качестве схем подключения емкостных датчиков могут использоваться резонансные схемы (рис. 3.8).

В таких схемах при изменении емкости датчика $C_х = C_0 + \Delta C$ напряжение (рис. 3.8, *а*) или ток (рис. 3.8, *б*) в цепи резонансного контура будут меняться, достигая максимума при резонансной частоте

$$\omega = 1/\sqrt{LC}. \qquad (3.3)$$

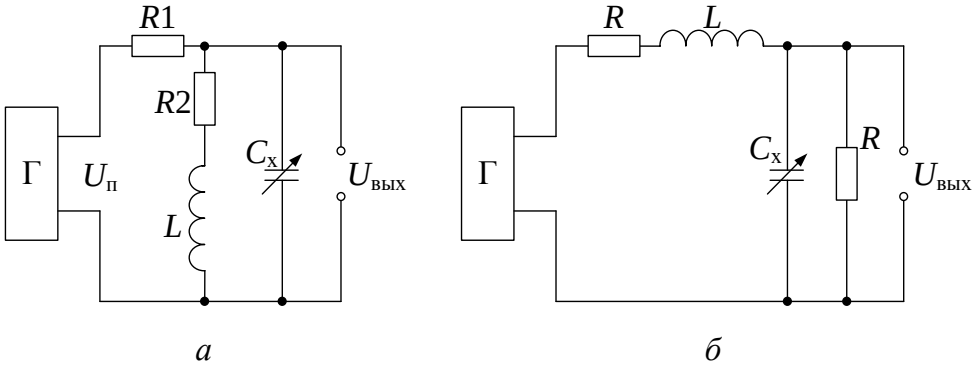


Рисунок 3.8 – Резонансные измерительные системы:
а – параллельный колебательный контур;
б – последовательный колебательный контур

На склонах резонансной кривой (рис. 3.9) выбирается участок близкий к линейному, в середине которого выбирается точка *M*, соответствующая значению C_0 емкости преобразователя. При изменении емкости на $\pm\Delta C$ напряжение на выходе будет меняться $\pm\Delta U_{вых}$.

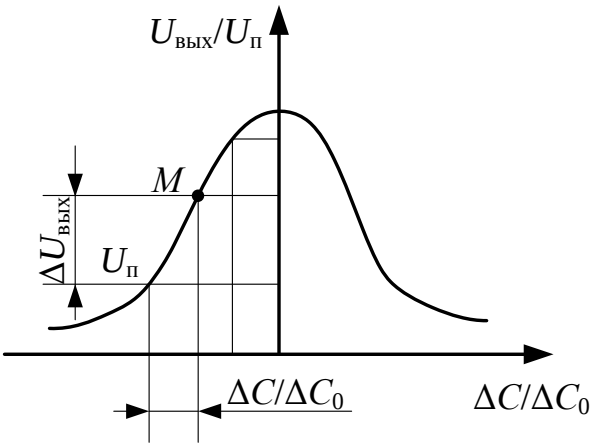


Рисунок 3.9 – К определению функции преобразования резонансной схемы включения

3.3. Емкостной датчик уровня жидкости

В качестве примера может быть рассмотрен датчик уровня жидкости. Его конструкция имеет вид, изображенный на рис. 3.10.

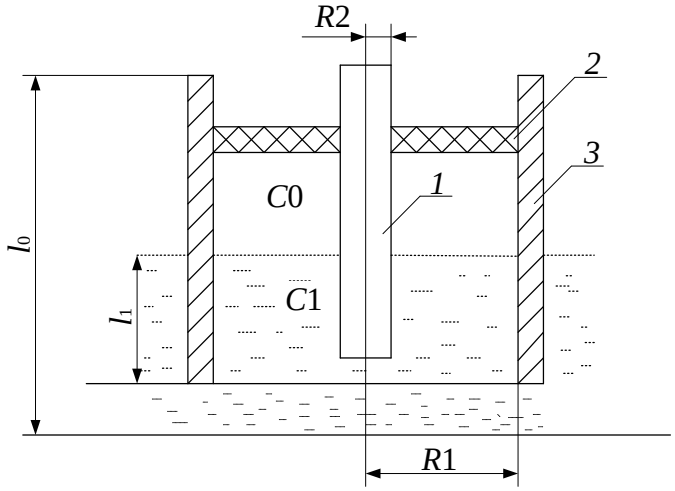


Рисунок 3.10 – Конструкция датчика уровня жидкости:
1 – цилиндрический электрод, *2* – изоляционное кольцо,
3 – полый цилиндр, который опускается в жидкость.

Преобразователь состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов *C*1 и *C*0. *C*0 – диэлектрик-воздух, *C*1 – диэлектрик-жидкость. Емкость такого преобразователя равна:

$$C = C1 + C0 = \left[\varepsilon_1 l + (l_0 - l_1)\varepsilon_0\right] \cdot \frac{2\pi}{\ln \frac{R1}{R2}}, \qquad (3.4)$$

где ε_1 и ε_0 – диэлектрические проницаемости соответственно жидкости и воздуха; R – радиусы электродов.

3.4. Емкостной датчик угла поворота

Такой преобразователь реализован по схеме с переменной площадью пластин (рис. 3.11 *а*) и имеет вид:

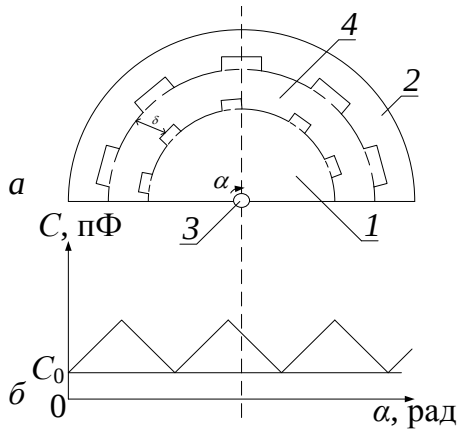


Рисунок 3.11 – Емкостной преобразователь угла поворота ротора (*а*): *1* – ротор датчика; *2* – статор датчика; *3* – ось вращения системы; *4* – воздушный зазор. Зависимость емкости датчика от угла поворота α (*б*). C_0 – начальная емкость

Зависимость емкости датчика от угла поворота α приведена на рисунке 3.11, *б*. Емкость при вращении изменяется от максимума (зубья один против другого) до минимума (зуб против впадины).

Преимуществом такого преобразователя является: возможность путем выбора формы подвижной и неподвижной пластин получить требуемую зависимость между угловым перемещением и величиной емкости.

На работу емкостных преобразователей влияние оказывают температурные изменения и изменения влажности окружающей среды. Для снижения температурной погрешности обкладки преобразователей выполняют из сплавов с малым температурным коэффициентом линейного расширения. Для уменьшения влияния влажности применяют герметизацию емкостных преобразователей.

Минимальное расстояние между электродами выбирается из расчета пробивного напряжения, так, для воздуха оно равно около 4,5 кВ/мм. Питание таких преобразователей осуществляют обычно переменным током повышенной частоты – от кГц до десятков МГц.

3.5. Емкостной датчик влажности

Конструкция емкостного датчика влажности приведена на рис. 3.12.

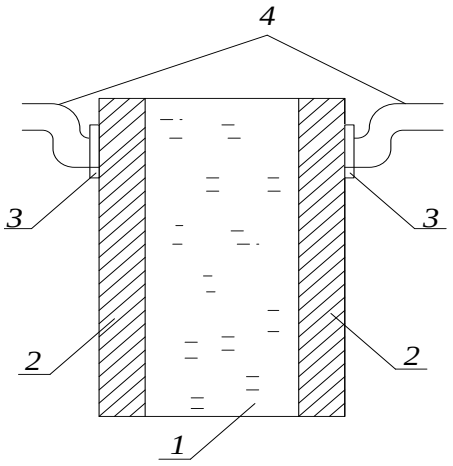


Рисунок 3.12 – Датчик влажности:
1 – диэлектрическая пленка; *2* – напыление (пленка золота);
3 – омический контакт; *4* – отводящие провода

С помощью схемы изменение емкости из-за влажности преобразуют в изменение постоянного напряжения.

На рис. 3.13 показана зависимость емкости датчика C_S от относительной влажности F при частоте питающего напряжения $f_п = 100\ кГц$.

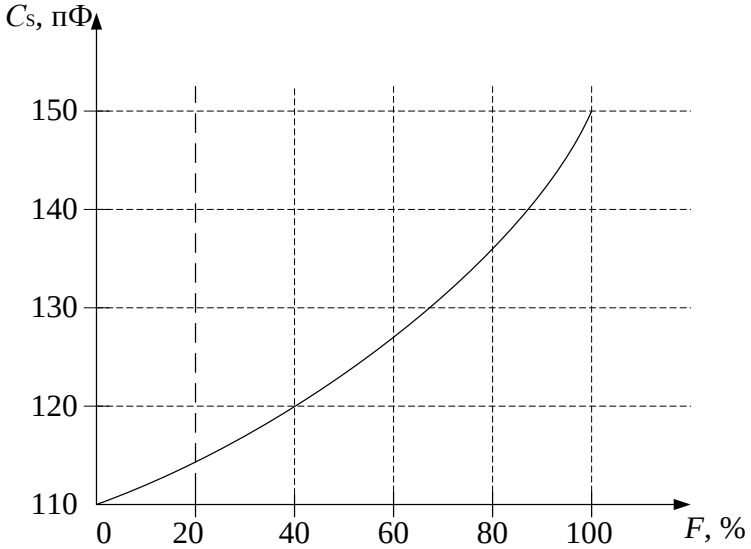


Рисунок 3.13 – Зависимость емкости C от влажности F

Т.к. характеристика нелинейная, требуется специальная калибровочная шкала измерительного прибора. Иногда можно включать дополнительную схему линеаризации.

3.6. Емкостные преобразователи давления

Чувствительными элементами емкостных преобразователей давления являются мембраны и диафрагмы, преобразующие измеряемое давление в перемещение. При этом они могут быть одновременно использованы в качестве подвижного электрода.

Под действием равномерного давления P – мембрана (рис. 3.14, *а*) будет принимать форму сферы, а ее отклонение y от первоначального положения (при $P = 0$) для любого радиуса r при незначительном прогибе

$$y = \frac{P}{4W}(R^2 - r^2), \tag{3.5}$$

где W – жесткость мембраны; R – ее радиус.

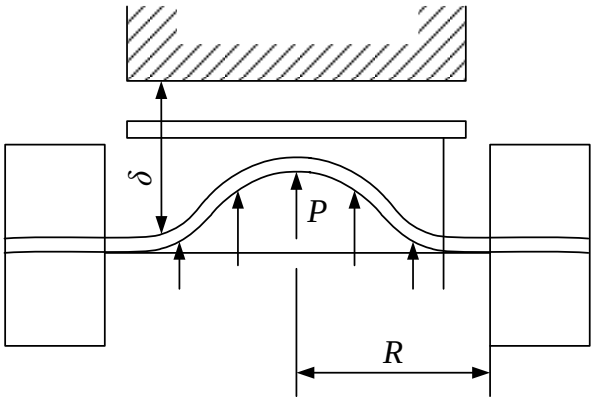


Рисунок 3.14 – Конструкция чувствительных элементов емкостных преобразователей давления

Для узкой кольцевой зоны на сфере мембраны шириной dr и длиной $2\pi r$, первоначально находящейся на расстоянии δ от неподвижного электрода, приращение емкости

$$\Delta C = \varepsilon 2\pi \frac{rdr}{\delta - y}. \tag{3.6}$$

Для малых прогибов можно принять $\frac{1}{\delta - y} \cong \frac{1}{\delta}\left(1 + \frac{y}{\delta}\right)$, тогда полная емкость сферической поверхности мембраны и неподвижного электрода, диаметр которого $D \cong 2R$, при начальной емкости C_0

$$\begin{aligned} C_0 + \Delta C &= \int_0^R dC = \frac{2\pi\varepsilon}{\delta}\int_0^R \left(1 + \frac{y}{\delta}\right) rdr = \frac{2\pi\varepsilon}{\delta}\int_0^R \left[1 + \frac{P}{4\delta W}\left(R^2 - r^2\right)\right] dr = \\ &= \frac{\pi\varepsilon}{\delta}R^2 + \frac{\pi\varepsilon}{\delta}\frac{P}{2\delta W}\int_0^R \left(R^2 - r^2\right) rdr. \end{aligned} \tag{3.7}$$

Первый член этого выражения представляет собой начальную емкость C_0, следовательно приращение емкости

$$\Delta C = \frac{P\pi\varepsilon}{2\delta^2 W}\int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \frac{\pi\varepsilon P R^4}{8\delta^2 W}, \tag{3.8}$$

а относительно ее изменение

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{R^2 P}{8\delta W}. \tag{3.9}$$

Таким образом, чувствительность емкостного преобразователя давления с эластичной мембраной при малых ее прогибах пропорциональна приложенному давлению. Необходимо отметить, что полученный результат применим только для статических отклонений, когда можно пренебречь амортизирующим действием тонкой воздушной прослойки между мембраной и неподвижным электродом.

3.7. Емкостной датчик положения

На практике при измерении перемещения электропроводного объекта, его поверхность часто играет роль пластины конденсатора. Собственная пластина конденсатора должна быть экранирована, что позволяет повысить линейность преобразования и уменьшить влияние краевых эффектов. Типовой датчик перемещения работает на частотах в пределах нескольких мегагерц, поэтому может регистрировать быстрые перемещения объекта.

Емкостные датчики могут работать и с непроводящими средами и объектами, но при этом их точность несколько ухудшается. Для улучшения метрологических характеристик таких датчиков используют «активные экраны», включая их в измерительную схему датчика (рис. 3.15). Емкостные датчики регистрируют наличие перед чувствительной поверхностью объектов с отличной от 1 диэлектрической проницаемостью. Это могут быть металлы, вода, стекло, порошки, пластики и т.д. Состоит датчик из *RC* генератора, формирователя сигнала и выходного каскада. Пластины конденсатора у *RC*- генератора расположены на чувствительной поверхности датчика и формируют вблизи нее электростатическое поле. При изменении диэлектрической проницаемости, вызываемом управляющим объектом в зоне чувствительности выключателя, изменяется емкость колебательного контура генератора и соответственно частота генератора.

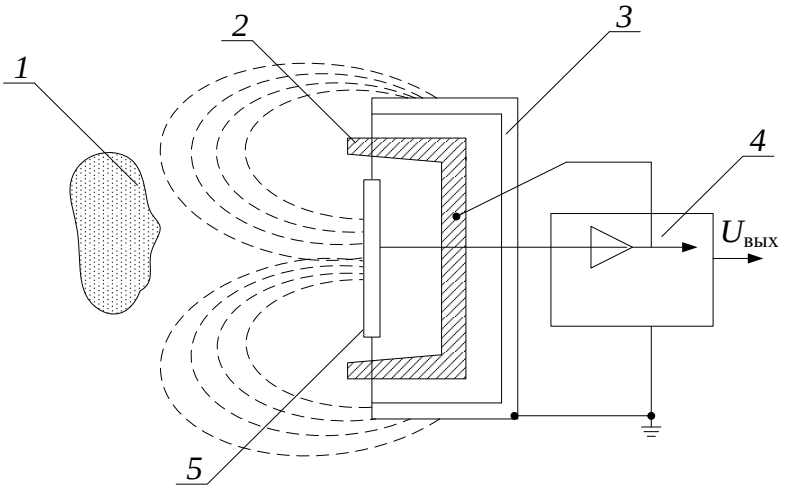


Рисунок 3.15 – К пояснению принципа действия емкостного датчика приближения:
1 – объект; *2* – активный экран; *3* – кожух; *4* – повторитель; *5* – электрод

Изменение частоты преобразуется демодулятором в изменение напряжения, что вызывает срабатывание триггера и затем приводит к изменению коммутационного состояния выключателя.В качестве коммутационных элементов используются мощные p-n-p и n-p-n транзисторы. Порог срабатывания (чувствительность) датчика зависит от диэлектрических свойств материала объекта. Подстройка чувствительности осуществляется при помощи потенциометра. На выходе таких датчиков обычно устанавливается p-n-p или n-p-n коммутирующий транзистор.

Лекция 4. ИНДУКТИВНЫЕ И ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ДАТЧИКИ

4.1. *Общие сведения.*
4.2. *Однотактный индуктивный датчик.*
4.3. *Двухтактные индуктивные преобразователи.*
4.4. *Трансформаторные датчики.*
4.5. *Индуктивные магнитоупругие преобразователи.*

4.1. Общие сведения

Принцип действия таких датчиков основан на изменении индуктивности, вызванное перемещением подвижной части датчика под действием измеряемой величины. Индуктивные датчики служат для измерения перемещений и сил.

Преимущества: большая надежность и значительно больший срок службы, чем у резистивных, так как в них отсутствуют скользящие омические контакты.

Недостатки: наличие остаточного сигнала; чувствительность к изменению напряжения питания; фазовые искажения.

Индуктивность обмотки магнитной системы с немагнитным зазором без учета рассеяния магнитного потока равна:

$$L = \frac{W^2}{z_{\text{м}}} = W^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_{\text{мс}} + R_{\text{м}\delta})^2 + (X_{\text{мс}} + X_{\text{м}\delta})^2}}, \qquad (4.1)$$

где W – число витков обмотки; $z_{\text{м}}$ – полное магнитное сопротивление магнитной цепи; $R_{\text{мс}}$ и $X_{\text{мс}}$ – активное и реактивное сопротивления немагнитного зазора (магнитное сопротивление); $R_{\text{м}\delta}$ и $X_{\text{м}\delta}$ – активное и реактивное магнитные сопротивления зазора системы.

Из выражения (4.1) видно, что индуктивность обмотки зависит от изменения активной и реактивной составляющих магнитного сопротивления зазора и магнитопровода.

Индуктивные преобразователи бывают однотактные и двухтактные.

4.2. Однотактный индуктивный датчик

Индуктивные датчики (измерители-преобразователи) предназначены для измерения сравнительно малых угловых или линейных механических перемещений и их преобразования в электрический сигнал переменного тока. В основу работы индуктивного измерительного преобразователя

положено свойство дросселя с воздушным зазором изменять индуктивность при изменении величины воздушного зазора.

Простейший индуктивный датчик состоит из ярма *1*, на котором помещается обмотка *2*, и якоря *3*, удерживаемого пружинами (рис. 4.1). Ярмо и якорь выполняются из шихтованного магнитомягкого материала. Обмотка наматывается медным проводом с малым активным сопротивлением.

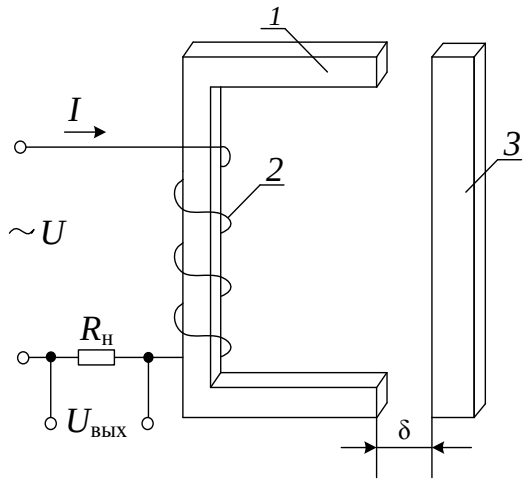


Рисунок 4.1 – Принцип действия однотактного индуктивного измерительного преобразователя

Принцип действия однотактного индуктивного измерительного преобразователя состоит в следующем.

На обмотку *2* через сопротивление нагрузки $R_н$ подается напряжение питания переменного тока с частотой от 50 Гц до нескольких килогерц. Ток, протекающий в цепи обмотки,

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_н + r_д)^2 + (\omega L)^2}}, \qquad (4.2)$$

где $r_д$ – активное сопротивление дросселя; ω – частота питающего напряжения; L – индуктивность обмотки датчика.

Поскольку активное сопротивление $R = R_н + r_д$ представляет собой постоянную величину, то изменение тока I может происходить только за счет изменения индуктивной составляющей сопротивления

$$x_L = \omega L,$$

которая в свою очередь зависит от величины воздушного зазора δ.

Таким образом, каждому значению зазора δ соответствует вполне определенное значение тока I, создающего падение напряжения на резисторе $R_н$

$$U_{\text{вых}} = I \cdot R_{\text{н}}, \tag{4.3}$$

представляющее собой выходной сигнал измерительного преобразователя.

Связь между входным сигналом и механическим перемещением δ, выходным сигналом и электрическим напряжением $U_{\text{вых}}$ определяется статической характеристикой

$$U_{\text{вых}} = f(\delta). \tag{4.4}$$

Аналитическое выражение функции (4.4) можно получить, пользуясь соотношениями (4.2) и (4.3), устанавливая связь между индуктивностью L и величиной зазора δ. Будем считать воздушный зазор достаточно малым. Тогда потоками рассеяния можно пренебречь и величина потокосцепления

$$\Psi = \Phi \cdot W, \tag{4.5}$$

где Φ – магнитный поток, создаваемый обмоткой; W – число витков обмотки.

С другой стороны

$$\Psi = L \cdot I. \tag{4.6}$$

Приравнивая (4.5) и (4.6), получим

$$L = \frac{\Phi \cdot W}{I}. \tag{4.7}$$

Магнитный поток Φ прямо пропорционален намагничивающей силе и обратно пропорционален магнитному сопротивлению

$$\Phi = \frac{F}{R_{\text{м.в}} + R_{\text{м.ж}}},$$

где $R_{\text{м.в}}$ – магнитное сопротивление зазора; $R_{\text{м.ж}}$ – магнитное сопротивление железа.

Так как намагничивающая сила $F = I \cdot W$, а магнитное сопротивление зазора намного больше сопротивления железа

$$L = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot W^2}{\dfrac{2 \cdot \delta}{\mu_0 \cdot S}} \cdot 10^{-8}\ \text{Гн}, \tag{4.8}$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Учитывая (4.8) и осуществляя последовательно подстановку в (4.2) и (4.3), получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{U \cdot R_{\text{н}}}{\sqrt{(R_{\text{н}} + r_{\text{д}})^2 + \left(\dfrac{0{,}4 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot S \cdot W^2 \omega}{2\delta} \cdot 10^{-8}\right)^2}}. \tag{4.9}$$

Реальная характеристика приведена на рис. 4.2 сплошной линией. Отклонение ее от идеальной при малых значениях δ объясняется допущением того, что $R_{м.ж} \square R_{м.в}$, а также эффектом «выпучивания поля» в зазорах магнитопровода.

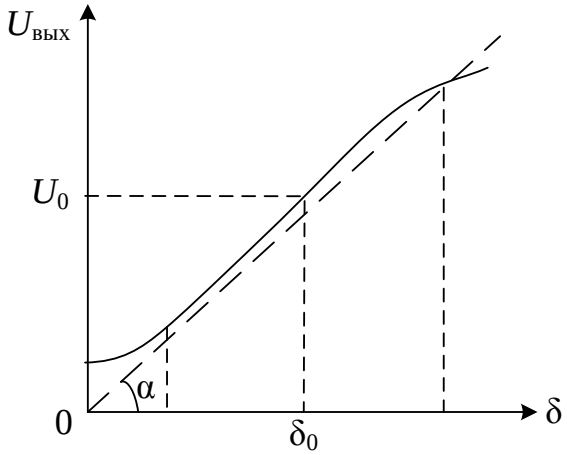


Рисунок 4.2 – Функция преобразования однотактного индуктивного измерительного преобразователя

Если δ достаточно мало, то магнитное сопротивление железа становится соизмеримым с магнитным сопротивлением зазора и, следовательно, такое допущение вносит соответствующую погрешность. Отклонение реальной характеристики от линейной функции при больших значениях δ связано с другим допущением, согласно которому сопротивление нагрузки $R_н$ считается пренебрежимо малым по сравнению с индуктивным сопротивлением. Но при больших значениях δ величина индуктивности L становится малой, поэтому индуктивная составляющая ωL соизмерима с величиной $(R_н + r_д)$, что и определяет искажение характеристики.

Анализ принципа действия и статической характеристики однотактного индуктивного измерительного преобразователя позволяет отметить следующие его недостатки:

1. фаза выходного сигнала не зависит от направления перемещения якоря;

2. для измерения перемещения в обоих направлениях необходим начальный зазор δ_0, что приводит к наличию начального значения напряжения U_0 (см. рис. 4.2);

3. на якорь постоянно действует электромагнитная сила, стремящаяся притянуть его к ярму. При большой мощности сигнала выходной цепи она может принимать существенные значения, что требует

введения компенсирующих сил, создаваемых противодействующими пружинами. Это значительно усложняет устройство.

В силу указанных недостатков однотактные индуктивные измерительные преобразователи используются только в качестве вспомогательных элементов систем. В основных цепях систем управления применяют двухтактные индуктивные измерительные преобразователи.

4.3. Двухтактные индуктивные преобразователи

Существуют две основные схемы включения двухтактных индуктивных измерительных преобразователей: дифференциальная и мостовая. Рассмотрим каждую из них.

Дифференциальная схема. Такая схема включения индуктивного измерительного преобразователя предполагает наличие трансформатора со средней точкой (рис. 4.3). Обе обмотки измерительного преобразователя имеют одинаковое число витков *W*. Сердечники обмоток идентичны по своим характеристикам. Сопротивление нагрузки включается между средней точкой обмотки трансформатора и средней точкой обмоток измерительного преобразователя. При таком включении ток, протекающий по сопротивлению нагрузки, равен разности токов правой и левой половин схемы

$$I_{\text{вых}} = I_1 \cdot I_2, \tag{4.10}$$

а выходное напряжение определяется как $U_{\text{вых}} = (I_1 - I_2) \cdot R_{\text{н}}$. В исходном положении зазоры между якорем и ярмом одинаковы $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$. Тогда индуктивности каждой половины датчика, определяемые величиной зазоров, $L_1 = L_2 = L_0$. Следовательно, токи I_1 и I_2 равны по модулю, но противоположны по фазе, а ток нагрузки, согласно (4.10), равен нулю, значит и выходное напряжение датчика равно нулю.

Таким образом, двухтактный индуктивный датчик обеспечивает равенство нулю выходного сигнала ($U_{\text{вых}} = 0$) при нулевом сигнале на входе ($\Delta = 0$).

При перемещении якоря на величину Δ ширина зазоров изменяется: один увеличивается, а второй уменьшается на одну и ту же величину

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \delta_0 + \Delta; \\ \delta_2 &= \delta_0 - \Delta. \end{aligned} \tag{4.11}$$

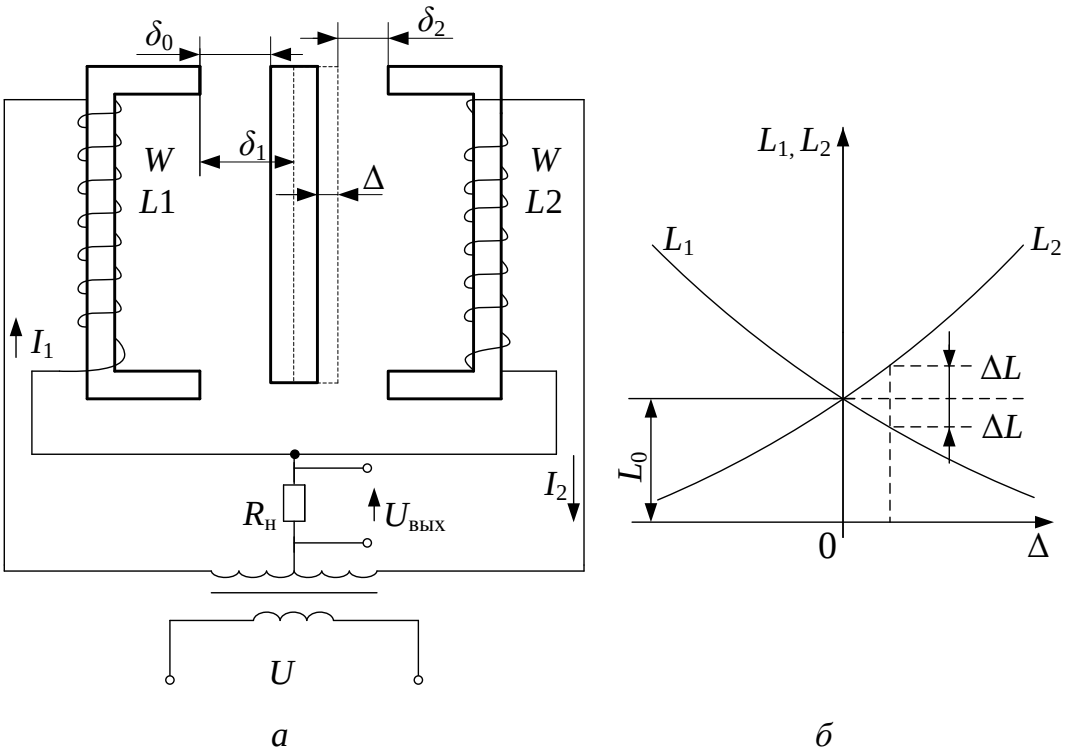


Рисунок 4.3 – Дифференциальная схема подключения двухтактного индуктивного измерительного преобразователя:
а – принцип действия; *б* – зависимость индуктивности от ширины зазора

Это приводит к изменению индуктивностей, так как магнитное сопротивление первого зазора растет, а второго – падает, что соответствует уменьшению индуктивности L_1 и увеличению индуктивности L_2. При небольших перемещениях индуктивность изменяется почти по линейному закону. На рис. 4.3, *б* изображен график зависимости $L = f(\Delta)$ для обеих половин индуктивного датчика. В соответствии с графиком $L_1 = L_0 - \Delta L;\ L_2 = L_0 + \Delta L$. Изменение индуктивностей L_1 и L_2 приведет к нарушению баланса токов: ток I_1 возрастет, а I_2 – уменьшится. В нагрузке потечет результирующий ток, создающий выходное напряжение. При изменении направления перемещения якоря фаза выходного напряжения сдвинется на 180° относительно напряжения питания, являющегося опорным.

Мостовая схема (рис. 4.4). Если в дифференциальной схеме рассматривалась разность токов в нагрузке, то в мостовой схеме следует рассматривать разность падений напряжений на плечах моста, которая определяет выходное напряжение двухтактного индуктивного датчика

$$U_{\text{вых}} = U_1 - U_2, \tag{4.12}$$

где $U_1 = I_1 \cdot Z$, а $U_2 = I_2 \cdot Z$.

Принцип действия мостовой схемы включения аналогичен принципу действия дифференциальной схемы. Выходное напряжение мостовой схемы в математической форме записи сводится к зависимости, подобной дифференциальной схеме, т.е.

$$U_{\text{вых}} = Z(I_1 - I_2). \tag{4.13}$$

Используя выражение (4.13), получим аналитическое описание статической характеристики двухтактного индуктивного датчика

$$U_{\text{вых}} = f(\Delta),$$

которое будет справедливо как для мостовой, так и для дифференциальной схемы включения.

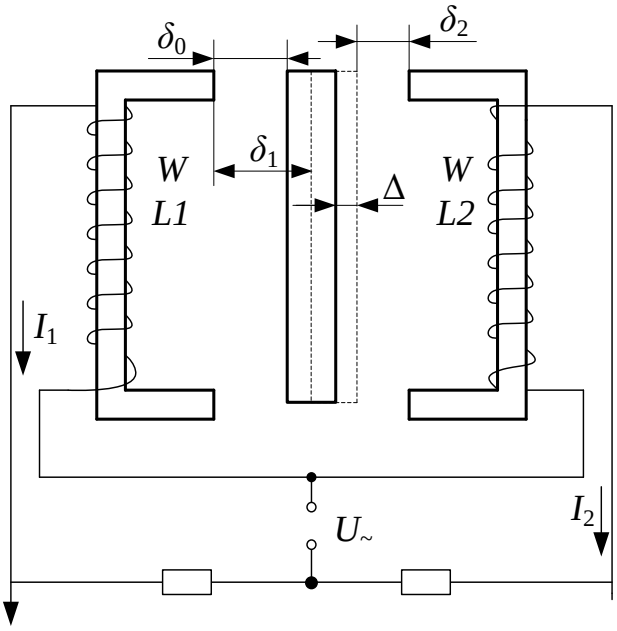


Рисунок 4.4 – Мостовая схема включения дифференциального индуктивного преобразователя

Таким образом, статическая характеристика двухтактного индуктивного измерительного преобразователя представляет собой функцию вида

$$\left|U_{\text{вых}}\right| = k\Delta, \tag{4.14}$$

что соответствует прямой, проходящей через начало координат под углом $\alpha = \operatorname{arctg} k$ к оси абсцисс (рис. 4.5). При изменении знака приращения входной координаты Δ фаза выходного сигнала меняется на противоположную. С некоторого значения Δ реальная статическая характеристика индуктивного датчика не совпадает с линейной характеристикой (4.14) вследствие того, что индуктивность одного из плеч измерителя-преобразователя становится малой, а индуктивное сопротивление ωL – соизмеримо с сопротивлением нагрузки r, в связи с

чем появляется завал линейной характеристики. В результате этого статическая характеристика двухтактного индуктивного измерительного преобразователя при некоторой ее идеализации может быть представлена нелинейностью типа «насыщение».

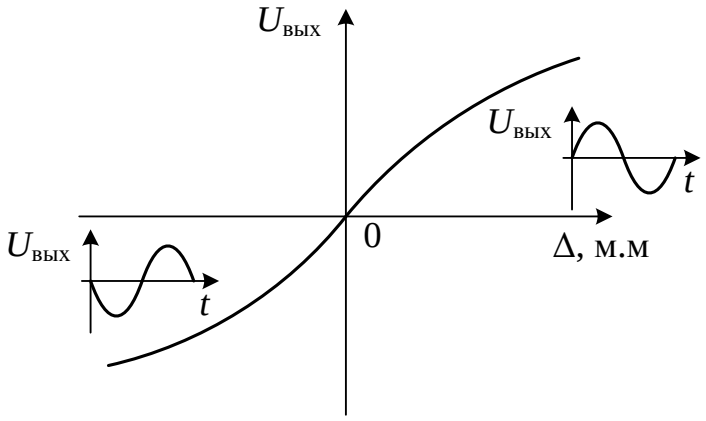


Рисунок 4.5 – Функция преобразования индуктивного дифференциального датчика

Чувствительность измерительного преобразователя зависит от напряжения и частоты источника питания, сопротивления нагрузки, индуктивности дросселя и начального зазора между ярмом и якорем.

С повышением питающего напряжения чувствительность датчика повышается, но это влечет за собой увеличение его габаритных размеров и массы.

4.4. Трансформаторные датчики

Трансформаторные датчики применяются для измерения механических перемещений и сил.

Это трансформаторные устройства с переменной магнитной связью между первичной и вторичной обмотками.

В отличии от индуктивных датчиков они не имеют гальванической связи между источником питания и цепью нагрузки. В них отсутствует скользящий контакт между подвижной и неподвижной частями. Они технологически просты.

К *их недостаткам* относят наличие остаточного сигнала влияние внешних электромагнитных полей.

Трансформаторные датчики конструктивно делятся на: *с перемещающимся якорем* (рис. 4.6); *с перемещающимся электромагнитным экраном* (рис. 4.7); *с перемещающейся обмоткой* (рис. 4.8).

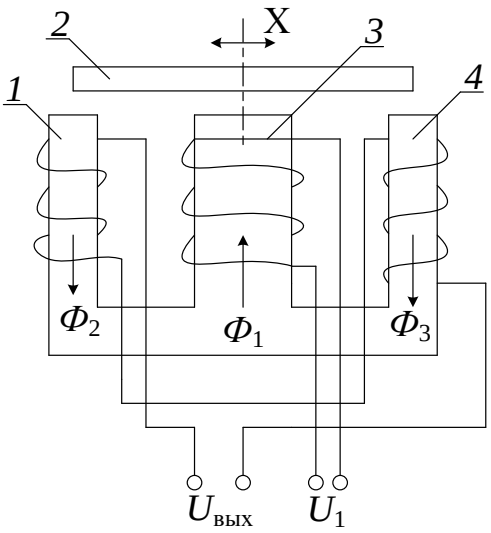


Рисунок 4.6 – Трансформаторный преобразователь с перемещающимся якорем: *1-4* – крайние стержни магнитопровода; *2* – якорь; *3* – средний стержень

В конструкции с перемещающимся якорем первичная обмотка надета на средний стержень *3*. Секции вторичной обмотки на стержнях *1* и *4*, включены последовательно и встречно.

При симметричном положении якоря *2* на выводах вторичных катушек возникают равные по величине, совпадающие по фазе, но противоположно направленные ЭДС. $U_{вых}$ равно 0. При смещении якоря будет перераспределение магнитных потоков *1* и *4*.

На выходе появляется сигнал, пропорциональный величине смещения якоря, фаза зависит от направления смещения. Такая конструкция не имеет подвижной обмотки, что существенно облегчает подвод тока в катушки.

Преобразователь *с перемещающимся электромагнитным экраном* (короткозамкнутым витком) (рис. 4.7). Магнитная система датчика имеет зазор между средним стержнем *2* и горизонтальным магнитопроводом *4*, виток *3* может свободно перемещаться.

В конструкции с перемещающимся экраном первичная обмотка с напряжением U_1 надета на стержень *2*. Катушки *1* и *5 секций вторичной обмотки включены последовательно и встречно*.

При отклонении короткозамкнутого витка (КЗВ) (*3*) от среднего положения происходит перераспределение потоков $Ф_2$ и $Ф_3$. Появляется выходной сигнал $U_{вых}$, который растёт по мере удаления КЗВ от центра.

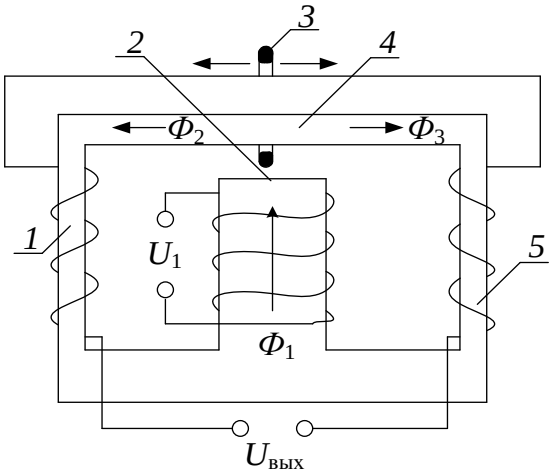


Рисунок 4.7 – Трансформаторный преобразователь с перемещающимся экраном (с короткозамкнутым витком):
1, 5 – обмотковые стержни; *2* – средний стержень; *3* – КЗВ;
4 – горизонтальный магнитопровод

Преобразователи *с перемещающейся обмоткой* (рис. 4.8) имеют большую чувствительность, малый остаточный сигнал, не чувствительны к поперечным колебаниям обмотки. Взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками изменяется при перемещении вторичной обмотки в магнитном поле первичной обмотки.

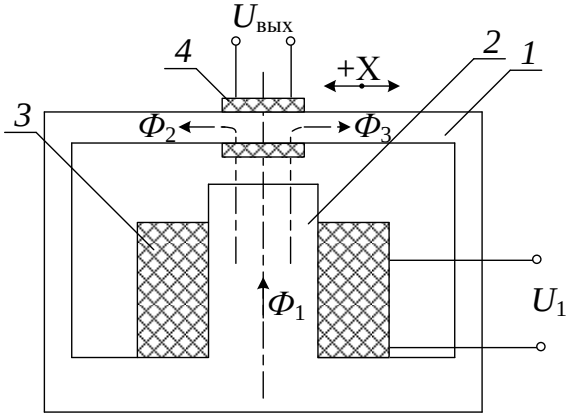


Рисунок 4.8 – Преобразователь с перемещающейся обмоткой:
1,2 – вертикальный и горизонтальный сердечник; *3* – первичная обмотка;
4 – вторичная обмотка

В зазоре магнитопровода между *2* и *1* перемещается вторичная обмотка *4*. Первичная обмотка *3* создает магнитный поток Φ_1. При симметричном положении обмотки *4* потоки Φ_2 и Φ_3 равны. При этом выходное напряжение $U_{вых} = 0$. При смещении обмотки *3* от центра возникает разность потоков Φ_2 и Φ_3, в обмотке *4* возникает $U_{вых}$, зависящее от направления и величины перемещения.

4.5. Индуктивные магнитоупругие преобразователи.

Принцип действия индуктивных магнитоупругих преобразователей основан на *эффекте Виллари* – изменении магнитной проницаемости μ ферромагнитных тел под воздействием механических сил (сжатие, растяжение).

К магнитоупругим материалам относятся железоникелевые и железокобальтовые сплавы (рис. 4.9). Эффект Виллари может быть как положительным так и отрицательным.

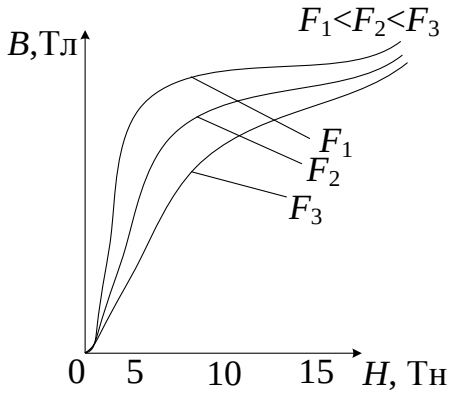


Рисунок 4.9 – Кривые намагничивания никеля:
$F_{1,2,3}$ – приложенное усилие

При уменьшении магнитной индукции B – снижается и магнитная проницаемость μ.

Магнитострикционный преобразователь представляет собой замкнутый магнитопровод с одной обмоткой (рис. 4.10). При изменении силы P меняется полное электрическое сопротивление обмотки. Обмотку включают в потенциометрическую или мостовую схему. Получают прямое преобразование механической силы в ток или напряжение.

Магнитоупругий преобразователь для измерений деформаций (рис.4.10, *б*) состоит из пермаллоевого магнитопровода *1*, помещённого внутрь катушки *2*, и жестко связанного с исследуемой деталью *3*. На деталь действует растягивающее усилие P. Деформация провода *1* ведет к изменению индуктивности катушки и к изменению полного сопротивления Z.

Преобразователь с использованием *эффекта Видемана* используют для *измерения крутящего момента*. (Густав Видеман, 1826-1899, немецкий физик, изучал влияние кручения на готовые стальные магниты) (рис.4.10, *в*).

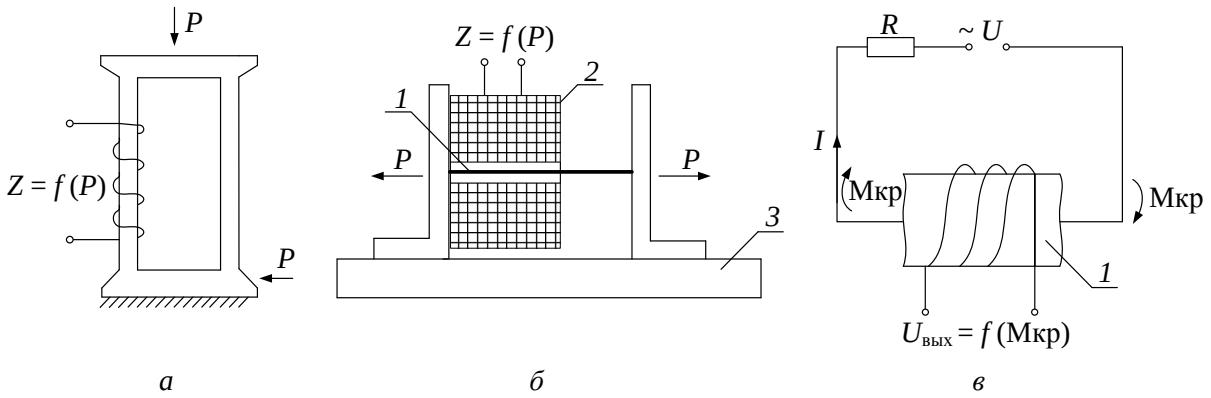


Рисунок 4.10 – Схемы магнитострикционных преобразователей:
а – принцип действия; *б* – конструкция;
в – преобразователь с использованием эффекта Видемана

В ферромагнитном стрежне при действии крутящего момента появляется винтовая составляющая повышенной магнитной проницаемости.

Если при этом через стержень *1* проходит переменный ток, то в стержне появляется винтовая составляющая магнитного потока, которая есть результатом сложения продольного и поперечного потоков, при этом продольный переменный поток создает в обмотке на стержне ЭДС, пропорциональную крутящему моменту.

Статические характеристики магнитоупругих преобразователей характеризуются нелинейностью и явлением гистерезиса: характеристики при увеличении и уменьшении нагрузки разные.

Лекция 5. ИНДУКЦИОННЫЕ ДАТЧИКИ

5.1. *Общие сведения.*
5.2. *Преобразователь с взаимным перемещением катушки и магнита.*
5.3. *Преобразователь с изменяющейся величиной поля постоянного магнита.*
5.4. *Преобразователи угловой скорости.*
5.5. *Тахогенераторы.*
5.6. *Индукционные преобразователи для расходомеров.*

5.1. Общие сведения

Индукционные преобразователи основаны на использовании явления электромагнитной индукции. Такие преобразователи относятся к группе генераторных т.е. преобразуют информационный параметр входного сигнала непосредственно в электрическую энергию. При наличии дополнительного источника энергии выходная мощность таких преобразователей может быть больше входной, так как происходит преобразование неэлектрической энергии в электрическую.

Согласно закону электромагнитной индукции, ЭДС в контуре определяется формулой $e = -d\Psi/dt$, где Ψ – потокосцепление контура. Таким образом, выходной величиной индукционного преобразователя является ЭДС, а входной – скорость изменения потокосцепления.

В общем случае индукционный преобразователь представляет собой катушку с сердечником, которая характеризуется некоторым обобщенным параметром D и ЭДС в которой может индуктироваться как в результате изменения во времени внешнего магнитного поля, так и в результате изменения во времени параметра D преобразователя. Если преобразователь находится в однородном магнитном поле с индукцией B, то в его обмотке, имеющей W витков, наводится ЭДС

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -W\frac{d\Phi}{dt} = -W\left(D\frac{\partial B}{\partial t} + D\frac{\partial D}{\partial t}\right). \qquad (5.1)$$

Обобщенный параметр преобразователя $D = \dfrac{S\mu'}{1 + N(\mu' - 1)}\cos\alpha$ является функцией четырех частных параметров α, S, μ' и N, где α – угол между магнитной осью преобразователя, совпадающей с нормалью к плоскости обмотки, и вектором магнитной индукции; S – площадь поперечного сечения катушки; μ' – магнитная проницаемость среды в единицах μ_0; N – коэффициент размагничивания сердечника, определяе-

мый формой и соотношением размеров сердечника.

Обычно в преобразователе изменяется один из параметров при постоянных значениях остальных, и из уравнения (5.1) можно получить пять частных уравнений преобразования индукционных преобразователей.

При D = const

$$e\left[B(\mathrm{t})\right] = -W \cdot S \frac{\mu'}{1 + N(\mu' - 1)} \cos\alpha \frac{dB}{dt}, \tag{5.2}$$

при B = const

$$e\left[\alpha(\mathrm{t})\right] = W \cdot S \frac{\mu' B}{1 + N(\mu' - 1)} \sin\alpha \frac{d\alpha}{dt}, \tag{5.3}$$

$$e\left[S(\mathrm{t})\right] = -W \frac{\mu' B}{1 + N(\mu' - 1)} \cos\alpha \frac{dS}{dt}, \tag{5.4}$$

$$e\left[N(\mathrm{t})\right] = W \cdot S \cdot B \cdot \cos\alpha \frac{\mu'(\mu' - 1)}{\left[1 + N(\mu' - 1)\right]^2} \frac{dN}{dt}, \tag{5.5}$$

$$e\left[\mu(\mathrm{t})\right] = -W \cdot S \cdot B \cdot \cos\alpha \frac{1 - N}{\left[1 + N(\mu' - 1)\right]^2} \frac{d\mu'}{dt}. \tag{5.6}$$

Для катушек без сердечников уравнения преобразования существенно упрощаются и для основных видов преобразователей сводятся к следующим:

а) для неподвижной катушки в переменном магнитном поле ($B = B_m \cos\omega t, \alpha = 0$)

$$e = \omega \cdot W \cdot S \cdot B_m \cdot \sin\omega t;$$

б) для катушки, вращающейся с частотой ω в постоянном магнитном поле с индукцией B_0

$$e = \omega \cdot W \cdot S \cdot B_0 \cdot \sin\omega t;$$

в) для контура, отдельные участки которого линейно перемещаются в магнитном поле, изменяя площадь потокосцепления с контуром,

$$e = \oint_l \left[\upsilon \cdot B\right] dl;$$

г) для отрезка длиной l, движущегося в однородном магнитном поле со скоростью υ так, что направления векторов l, B, υ взаимноперпендикулярны,

$$e = \upsilon \cdot B \cdot l.$$

Индукционные преобразователи широко применяются для измерения параметров магнитных полей, частоты вращения, параметров вибрации и сейсмических колебаний, расхода жидких веществ.

5.2. Преобразователь с взаимным перемещением катушки и магнита

Преобразователь с взаимным перемещением катушки и магнита изображен на рис. 5.1.

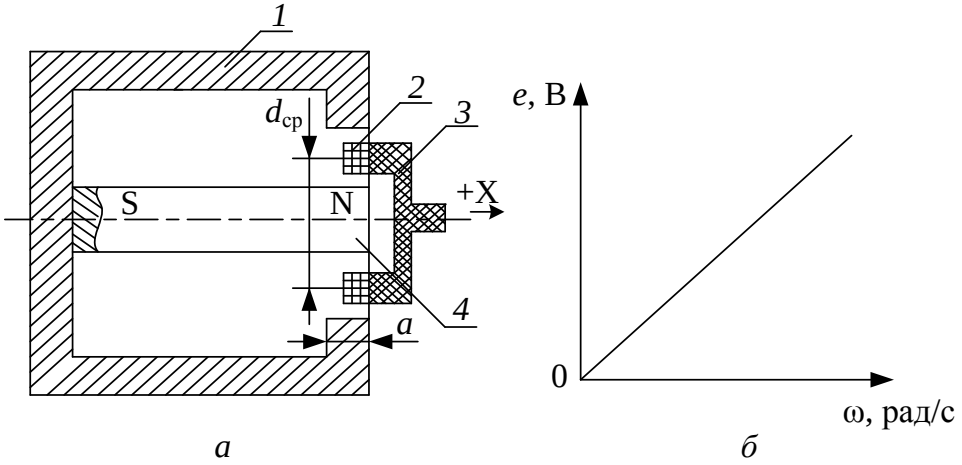


Рисунок 5.1 – Преобразователь с взаимным перемещением катушки и магнита: *а* – принципиальная схема; *б* – функция преобразования

Постоянный магнит *4* цилиндрической формы является источником потока, замыкающегося через магнитопровод *1* и воздушный зазор. Магнитопровод имеет форму полого цилиндра. В воздушном зазоре вдоль оси перемещается сигнальная обмотка *2* в виде кольца. Обмотка залита эпоксидным компаундом *3*, что обеспечивает ей прочность и крепление с другими подвижными деталями.

При перемещениях сигнальной обмотки в ней наводится ЭДС:

$$e = -W \cdot \frac{d\Phi}{dt}, \tag{5.7}$$

где W – число витков обмотки; Φ – магнитный поток, пронизывающий обмотку.

Поток Φ разветвляется на два потока:

$$\Phi = \Phi_{вх} + \Phi_{т}, \tag{5.8}$$

где $\Phi_{вх}$ – поток воздушного зазора, сцепленный с витками обмотки и изменяющийся при ее перемещении; $\Phi_{т}$ – торцовый поток, не зависящий от перемещения обмотки.

Подставляя выражение (5.8) в уравнение (5.7), находим

$$e = -W \cdot (\frac{d\Phi_{вх}}{dt} + \frac{d\Phi_{т}}{dt}) = -W \cdot (\frac{d\Phi_{вх}}{dx} + \frac{d\Phi_{т}}{dx}) \cdot V,$$

где $V = \frac{dx}{dt}$ – линейная скорость перемещения обмотки. Учитывая, что

$\frac{d\Phi_{т}}{dx} = 0$, получаем

$$e = -W \cdot V \frac{d\Phi_{вх}}{dx}. \qquad (5.9)$$

Поток

$$\Phi_{вх} = B_{\delta} \cdot \pi \cdot d_{ср}(a/2 - x), \qquad (5.10)$$

где B_{δ} – индукция в точках зазора на поверхности цилиндра с диаметром $d_{ср}$; $d_{ср}$ – диаметр среднего витка обмотки; x – перемещение обмотки; a – размер полюса.

После подстановки составляющих получаем:

$$e = \pi \cdot B_{\delta} \cdot W \cdot d_{ср} \cdot V. \qquad (5.11)$$

Таким образом, наводимая ЭДС прямопропорциональна линейной скорости.

При синусоидальных колебаниях подвижной части $x = X_{m} \sin \omega t$ выходной сигнал равен

$$e = \pi \cdot \omega \cdot B_{\delta} \cdot W \cdot d_{ср} \cdot X_{m} \cdot \cos(\omega t), \qquad (5.12)$$

где X_{m} – амплитуда перемещения; ω – угловая скорость.

Из уравнения (5.12) следует, что в этом случае наводимая ЭДС изменяется по косинусоидальному закону и пропорциональна амплитуде и частоте колебаний обмотки.

5.3. Преобразователь с изменяющейся величиной поля постоянного магнита

Конструкция такого преобразователя приведена на рис. 5.2.

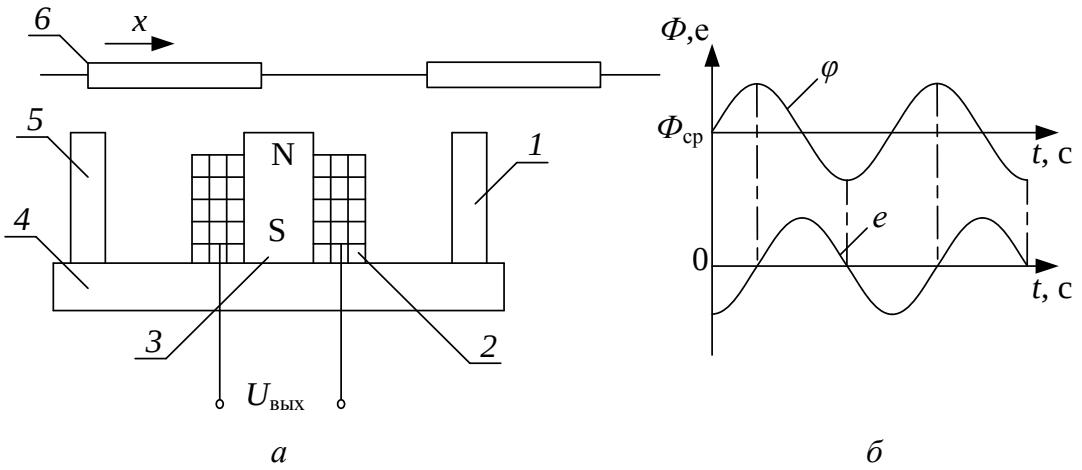


Рисунок 5.2 – Преобразователь с изменяющейся величиной поля постоянного магнита: *а* – принципиальная схема; *б* – характеристика преобразователя

Магнитная система преобразователя состоит из постоянного магнита *3*, магнитопровода *4* и полюсов *1* и *5*. Выходной сигнал снимается с обмотки *2*. При прохождении ферромагнитной детали *6* в направлении *x*, поток постоянного магнита вначале растет, так как увеличивается проводимость между магнитной системой и деталью *6*, а затем поток магнита уменьшается. Далее следует опять нарастание потока и вновь его уменьшение. В сигнальной обмотке наводится ЭДС, пропорциональная скорости изменения потока:

$$e = -W \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -W \cdot V \cdot \frac{d\Phi}{dx}. \qquad (5.13)$$

Из уравнения (5.13) следует, что наводимая ЭДС прямо пропорциональна линейной скорости и производной потока, пронизывающего обмотку, по перемещению. Потоки рассеяния при этом не учитываем. Форма кривой ЭДС близка к синусоидальной. Выходной сигнал преобразователя может быть включен через выпрямительный мост на измерительный прибор постоянного тока. Если на выход обмотки подключить счетчик импульсов, то по его показаниям можно определить также количество прошедших деталей.

5.4. Преобразователи угловой скорости

Схема преобразователя угловой скорости в электрический сигнал приведена на рис. 5.3. По принципу действия этот преобразователь относится ко второй группе. Преобразователь состоит из постоянного магнита *1*, жестко связанного с магнитопроводом *2*, на стержнях которого расположена обмотка. Обмотка состоит из двух катушек *3*, включенных последовательно и согласно. При вращении ротора *4*, периодически меняются магнитный поток и полная проводимость системы. В обмотке наводится ЭДС, пропорциональная скорости вращения ротора.

Наибольшее изменение магнитного потока

$$\Delta\Phi = F / Z_{\text{м}} - F / (Z_{\text{м}} + \Delta Z_{\text{м}}), \qquad (5.14)$$

где F – МДС магнита, а $Z_{\text{м}}$ и $(Z_{\text{м}} + \Delta Z_{\text{м}})$ – крайние значения магнитного сопротивления.

Амплитуда и действующее значение потока при синусоидальном его изменении соответственно равны

$$\Phi_{\text{т}} = \Delta\Phi / 2; \Phi = \Delta\Phi / (2\sqrt{2}). \qquad (5.15)$$

ЭДС, индуктируемая в обмотке, при этом равна

$$E_{\text{с}} = -j \cdot \omega \cdot W \cdot \Phi = -\frac{j \cdot \omega \cdot W \cdot F}{2\sqrt{2}}\left(\frac{1}{Z_{\text{м}}} - \frac{1}{Z_{\text{м}} + \Delta Z_{\text{м}}}\right). \qquad (5.16)$$

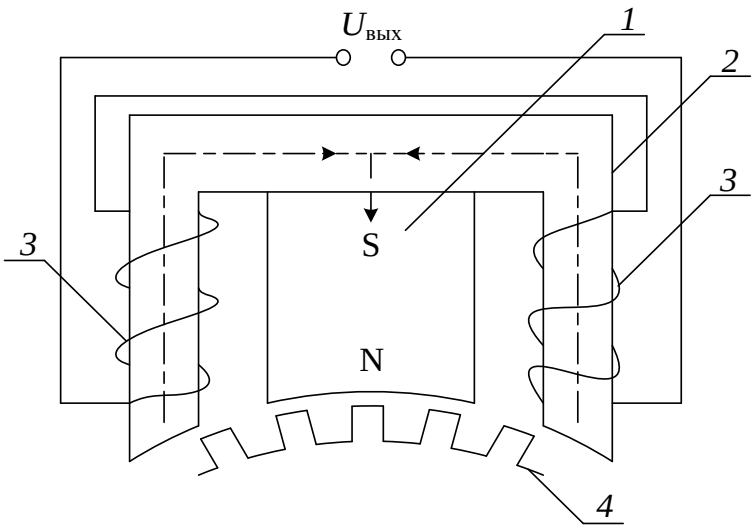


Рисунок 5.3 – Преобразователь угловой скорости:
1 – постоянный магнит; *2* – магнитопровод; *3* – катушка; *4* – ротор

При расчете обмотки необходимо учитывать реакцию ее поля, т.е. влияние МДС катушки на индукцию в воздушном зазоре. Ток обмотки должен быть достаточно мал, чтобы МДС ее была значительно меньше магнитного напряжения, создаваемого постоянным магнитом. При проектировании индукционного преобразователя скорости большое внимание следует уделить получению линейной зависимости индуктируемой ЭДС от скорости. Погрешность преобразователей первой группы составляет 0,02-0,1 %. У преобразователей второй группы линейность преобразования зависит от магнитных характеристик ферромагнитных материалов, из которых выполнена магнитная цепь. Поскольку эти характеристики обычно нелинейные, преобразователи второй группы имеют большую погрешность.

5.5. Тахогенераторы

Для измерения частоты вращения используются и специальные электрические машины малой мощности – *тахогенераторы*.

Тахогенератор постоянного тока (рис. 5.4, *а*) имеет обмотку возбуждения, создающую при питании постоянным током магнитный поток *Ф*. При вращении якоря в нем создается ЭДС, пропорциональная частоте вращения *n*:

$$E = k \cdot \Phi \cdot n, \qquad (5.17)$$

где k – постоянная, определяемая конструкцией.

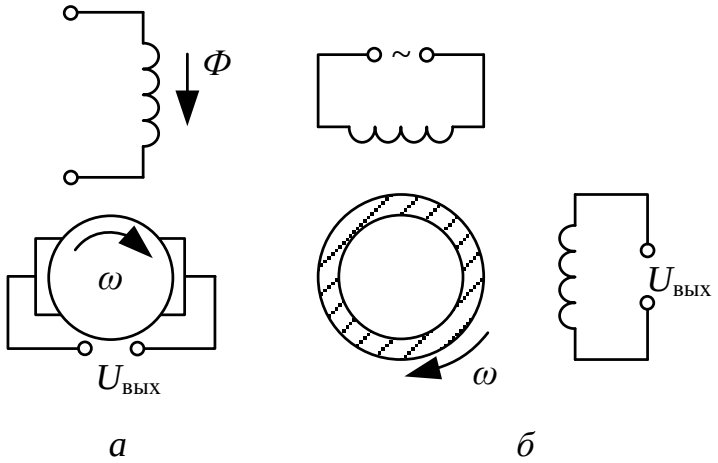


Рисунок 5.4 – Принципы постороения тахогенераторов:
а – постоянного тока; *б* – переменного тока

Напомним, что частота вращения n обычно выражается в 1/мин (количество оборотов в минуту) и связана со скоростью вращения ω выражением:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n / 60 \quad \text{или} \quad n = 60 \cdot \omega / 2 \cdot \pi. \qquad (5.18)$$

С помощью коллектора и щеток выходной сигнал подается на нагрузку в виде выпрямленного напряжения.

Тахогенератор переменного тока (рис. 5.4, *б*) имеет на статоре две обмотки, сдвинутые одна относительно другой на 90 электрических градусов. Одна обмотка включается в сеть переменного тока. При вращении ротора, выполненного в виде тонкостенного электропроводящего цилиндра, в другой обмотке наводится переменная ЭДС, которая пропорциональна частоте вращения n. Для повышения температурной стабильности в качестве материала полого ротора используется константан.

Тахогенераторы обладают высокой чувствительностью и мощностью выходного сигнала. Общим недостатком всех генераторных датчиков является зависимость выходного сигнала от сопротивления нагрузки.

5.6. Индукционные преобразователи для расходомеров

Принцип действия индукционного преобразователя расходомера поясняется рис. 5.5. В потоке жидкости, движущейся в трубопроводе *1* из немагнитного материала между полюсами магнита, возникает ЭДС, значение которой пропорционально скорости движения потока: $e = B \cdot D \cdot \upsilon$,

где B – магнитная индукция; D – диаметр трубы; υ – скорость движения жидкости. Эта ЭДС снимается с помощью электродов *2* и *3*, изолированных от трубопровода.

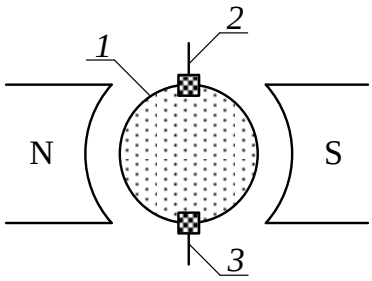


Рисунок 5.5 – Индукционный преобразователь расходомера

Как видно из приведенного уравнения (5.17), генерируемая в преобразователе ЭДС не зависит от свойств жидкости, и поэтому индукционные расходомеры принципиально могут быть применены для самого широкого класса жидкостей. Однако свойства жидкостей определяют внутреннее сопротивление преобразователя и возможности дальнейшего точного преобразования и измерения ЭДС, поэтому в технических характеристиках расходомера всегда указывается минимальная электрическая проводимость жидкости, для измерения расхода которой он может быть применен.

Индукционные расходомеры используются для измерения скоростей жидких металлов (жидкости с *электронной проводимостью*), водных растворов (жидкости с *ионной проводимостью*), и, кроме того, делаются попытки применить их для измерения скоростей диэлектрических жидкостей. Индукционные преобразователи расходомеров промышленного назначения имеют чувствительность 0,5-1,5 мВ/(м/с). Диаметр трубопроводов может быть весьма значительным, и поэтому для создания магнитного поля используются обычно не постоянные магниты, а электромагниты. В расходомерах для жидких металлов применяются электромагниты, питаемые постоянным током. В расходомерах для воды и электролитов используются электромагниты, питаемые для исключения напряжения поляризации только переменным током (частота 10-1000 Гц). В этом случае выходной сигнал $e = B_m \cdot D \cdot \upsilon \cdot \sin \omega t$ также является переменной ЭДС и из него легко могут быть исключены гальванические и термо- ЭДС. Однако в переменном магнитном поле, кроме ЭДС, обусловленной движением контура, будет индуктироваться ЭДС

$e_{\text{тр}} = -\partial\Psi / \partial t = W \cdot B_m \cdot S_к \cdot \cos\omega t$, называемая трансформаторной.

Для того чтобы уменьшить трансформаторную ЭДС, провода вторичного контура стремятся расположить так, чтобы площадь $S_к$ сцепления контура с переменным потоком была минимальной. Положение проводников, находящихся в поле, должно быть строго фиксировано, чтобы величина $S_к$ не изменялась. В контур вводятся специальные компенсационные петли, в которых наводится ЭДС $e'_{\text{тр}}$, включаемая встречно с ЭДС $e_{\text{тр}}$ и регулируемая так, чтобы $e_{\text{тр}} - e'_{\text{тр}} R / R_0 \approx 0$.

Кроме того, помеха в виде трансформаторной ЭДС и полезная ЭДС, пропорциональная скорости движения, как видно из приведенных выражений, сдвинуты по фазе на угол $\pi / 2$ и могут быть разделены на выходе фазочувствительным усилителем.

Лекция 6. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

6.1.*Общие сведения.*
6.2.*Пьезоэлектрические пленки.*
6.3. *Конструкции пьезоэлектрических датчиков.*
6.4. *Пьезорезистивные датчики.*

6.1. Общие сведения

Пьезоэлектрические преобразователи основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта, которым обладают некоторые кристаллы. Пьезоэлектрический эффект используется для преобразования переменных механических усилий в электрический сигнал.

Пьезоэлектрические преобразователи широко используются для измерения вибраций, переменных усилий, в качестве излучателей в ультразвуковых генераторах.

Различают *прямой* и *обратный* пьезоэффекты.

Прямой пьезоэффект состоит в том, что под действием механических напряжений на гранях кристаллов возникают электрические заряды.

Обратный пьезоэффект состоит в том, что под действием электрического поля происходят изменение геометрических размеров кристалла.

Пьезоэффект наиболее сильно выражен у кварца (SiO_2), турмалина (Bo + Li + Na + Fe + Mg) и у сегнетоэлектриков: сегнетовой соли – $C_4H_4O_6KNa\ 4H_2O$, титаната бария и др.

На рис. 6.1 показан пьезочувствительный элемент из кристалла кварца, который имеет форму параллелепипеда, при этом грани его ориентированы относительно кристаллографических осей *x, y, z* (*x* – главная, или оптическая, ось; *y* – электрическая ось; *z* – механическая, или нейтральная ось).

При действии силы сжатия P_x вдоль электрической оси на металлизированных гранях ABCD и EKGH, перпендикулярных оси *x,* возникают разнополярные электрические заряды. Величина этих зарядов q_x не зависит от геометрических размеров пьезочувствительных элемента, зависит от характеристик кристалла, т.н. «пьезоконстант» и определяется выражением:

$$q_x = k_п \cdot P_x, \qquad (6.1)$$

где $k_п$ – пьезомодуль материала.

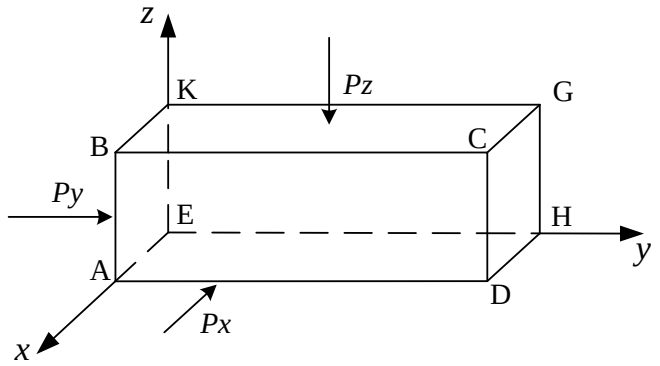


Рисунок 6.1 – Пьезочувствительный элемент:
x – главная (оптическая) ось; *y* – электрическая ось; *z* – механическая ось

Пьезомодуль характеризует чувствительность пьезоэлектрического материала и определяет величину электрического заряда, возникающего при приложении силы в 1 Ньютон. Изменение знака приложенной силы P_x приводит к изменению знака зарядов. Такой эффект называется *продольным пьезоэффектом*.

При действии силы сжатия P_y направленной вдоль оси *y*, на тех же гранях возникают также разнополярные заряды, величина которых зависит от приложенной силы и геометрических размеров граней:

$$q_y = -k_{\text{п}} \cdot \frac{S_x}{S_y} \cdot P_y, \tag{6.2}$$

где S_x и S_y – площади граней перпендикулярных осям *x* и *y*.

Это явление называется *поперечным пьезоэффектом*. При поперечном пьезоэффекте знак зарядов противоположен знаку зарядов, возникающих при продольном пьезоэффекте под воздействием сил того же направления (в формуле учитывается знаком минус).

Эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя приведена на рис. 6.2 на котором $C_{\text{п}}, L_{\text{п}}$ – эквивалентная емкость и индуктивность механической колебательной системы резонатора; $R_{\text{п}}$ – эквивалентное сопротивление потерь; C_0 – собственная емкость кристалла, образуемая кристаллодержателем или обкладками.

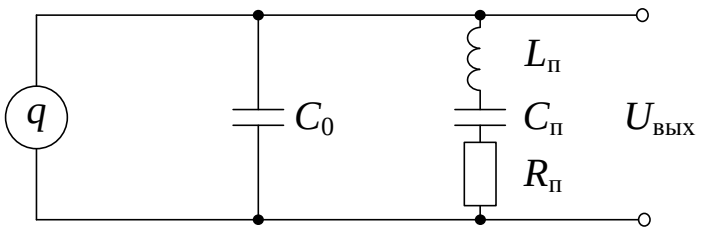


Рисунок 6.2 – Эквивалентная схема элемента

При синусоидальной силе $P_x = P_{mx} \cdot \sin(\omega t)$ ток с учетом (6.1)

$$i = dq_x / dt = \omega \cdot k_{\text{п}} \cdot P_{max} \cdot \cos \omega t, \tag{6.3}$$

где P_{mx} – амплитуда силы, действующей на оси x.

Пьезоэлектрические преобразователи для статических измерений не используются, так как заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента, имеет малую величину. Кроме того, происходит его утечка через изоляцию. При динамических процессах, под действием переменных сил, количество электричества все время восполняется, поэтому пьезоэлектрические преобразователи применяются для измерения динамических величин.

В качестве пьезоэлектрического материала в преобразователях широко применяется *кварц* и *цирконат-титанат свинца* (PZT). Такие преобразователи с точки зрения точности и стабильности характеристик являются наиболее подходящими для работы в расширенном диапазоне температур при больших значениях преобразуемых усилий. Недостатком кварца является малое значение пьезомодуля, низкая диэлектрическая проницаемость и малая собственная емкость кварцевых пластин, в результате чего емкость кабеля и нагрузки значительно уменьшает чувствительность преобразователя.

Малое значение выходного напряжения и большое внутреннее сопротивление пьезоэлектрических преобразователей требуют применения усилителей с большим входным сопротивлением.

6.2. Пьезоэлектрические пленки

В 1969 году японский ученый Каваи обнаружил сильный пьезоэлектрический эффект в PVDF пленках, а в 1975 году кампания Pioneer, Ltd выпустила первые громкоговорители и наушники, реализованные на основе PVDF. PVDF – это полукристаллический полимер, степень кристаллизации которого составляет 50%. Подобно другим полукристаллическим полимерам PVDF представляет собой слоевую структуру с аморфными зонами. Пленка является практически прозрачной в видимом и ближнем ИК (инфракрасном) диапазонах и поглощает излучение дальней ИК области электромагнитного спектра. PVDF является механически прочным и гибким материалом. Для применения в пьезодатчиках эту пленку обычно вытягивают в одном или сразу двух направлениях так, чтобы ее размеры увеличились в несколько раз. Коэффициенты упругости (такие как модуль Юнга) определяются величиной растяжения.

Хотя пьезоэлектрические коэффициенты пленки из PVDF не такие высокие как у некоторых других пьезоматериалов, например, у $BaTiO_3$ и PZT, они обладают уникальным свойством сохранять поляризацию даже при воздействии на них очень сильных переменных электрических полей. Это означает, что ее максимальная деформация может быть на порядок больше, чем у того же PZT, поскольку для PVDF предельно допустимая величина электрического поля в 100 раз превышает аналогичную характеристику для PZT. К тому же пленки из PVDF обладают очень хорошей временной стабильностью: при хранении при температуре 60°С они теряют за шесть месяцев только около 1–2 % чувствительности.

Другим преимуществом пьезопленок над пьезокерамикой является их низкий акустический импеданс, который по значению близок к воде, человеческим тканям и другим органическим материалам. Например, акустический импеданс пьезопленки отличается от импеданса воды только в 2,6 раз, в то время как для пьезокерамики он, как правило, в 11 раз больше. Близкие значения импедансов позволяют осуществлять более эффективную передачу акустических сигналов в воде и тканях.

Пьезоэлектрические пленки обладают следующими свойствами:

• широким частотным диапазоном: 0,001...10^9 Гц;

• низким акустическим импедансом: близким к воде, человеческим тканям и клеевым составам;

• высокой упругой податливостью;

• высоким выходным напряжением: в 10 раз выше, чем у пьезокерамики при одинаковых приложенных силах;

• высокой электрической прочностью диэлектрика: выдерживают поля до 75 В/мкм, при которых большинство пьезокерамических материалов теряют поляризацию;

• высокой механической прочностью и ударостойкостью: 10^9...10^{10} пределов прочности;

• высокой стабильностью: устойчивостью к влажности (влагопоглощение менее 0,02%), большинству химических реактивов, окислителям, мощному ультрафиолетовому (УФ) и ядерному излучениям;

• из них можно получать структуры произвольной формы;

• их можно соединять обычными клеями.

Как и другие ферроэлектрические материалы PVDF также обладает пироэлектрическими свойствами, т.е. на его поверхности образуется электрический сигнал в ответ на изменение температуры. Пленки из PVDF

сильно поглощают ИК лучи в диапазоне длин волн 720 мкм. Этот диапазон соответствует спектру длин волн, излучаемых человеческим телом. Однако, несмотря на то, что сами пленки из PVDF могут поглощать тепловое излучение, в пироэлектрических датчиках они располагаются между двумя тонкими электродами, которые иногда довольно сильно отражают волны интересующего диапазона. В таких случаях электрод, расположенный ближе к источнику тепловых излучений, либо покрывают теплопоглощающим слоем, либо изготавливают из нихрома (сплава, обладающего высокой поглощающей способностью).

На основе пленок из PVDF реализуют датчики перемещения людей, а также пироэлектрические датчики для более сложных устройств, таких как видеокамеры для ночного наблюдения и лазерные копировальные приборы.

В отличие от пьезокерамических преобразователей датчики на основе пьезоэлектрических пленок обладают более широкими динамическим и частотным диапазонами. Широкая полоса частот (практически от 0 до 2 ГГц) и низкая добротность могут быть объяснены мягкостью, присущей полимерам. Такие датчики нашли широкое применение в ультразвуковой технике, работающей на частотах до 50 кГц. Максимальный коэффициент передачи достигается на частоте резонанса по толщине. Основной полуволновой резонанс пленочного пьезоэлектрического сенсора толщиной 28 мкм наступает на частоте порядка 40 МГц. Частота резонанса всегда зависит от толщины пленки она меняется от единиц МГц для толстых пленок (≈1000 мкм) до >100 МГц для тонких пленок (порядка мкм).

Датчики на пьезоэлектрических пленках имеют и ряд ограничений. Они обладают довольно слабым электромеханическим коэффициентом связи по сравнению с пьезокерамическими сенсорами, особенно на частоте резонанса и на низких частотах. Пленки из сополимеров могут использоваться и храниться при температурах, не превышающих 135 °С, а PVDF пленки рекомендуется использовать при температурах до 100 °С.

6.3. Конструкции пьезоэлектрических датчиков

Пьезоэлектрические датчики используются для измерения давления, силы, ускорения. На рис. 6.3 показано устройство пьезоэлектрического датчика давления с двумя кварцевыми пластинами. Измеряемое давление действует на мембрану *1*, представляющую собой дно корпуса датчика. Пьезокерамические пластины *2* зажаты между металлическими прокладками *3*. Средняя прокладка *3* соединена с выводом *4*, проходящим через экранированную втулку *5* из изоляционного материала. Крышка *6*

соединяется с корпусом и через шарик *7* передает давление пластинам, благодаря чему измеряемое давление распределяется по поверхности кварцевых пластин более равномерно. Для уменьшения утечки зарядов необходима очень качественная изоляция. С этой же целью поверхность кварцевых пластин тщательно полируют. Использование двух (а иногда и больше) пластин повышает выходную ЭДС, поскольку выходные сигналы пластин складываются.

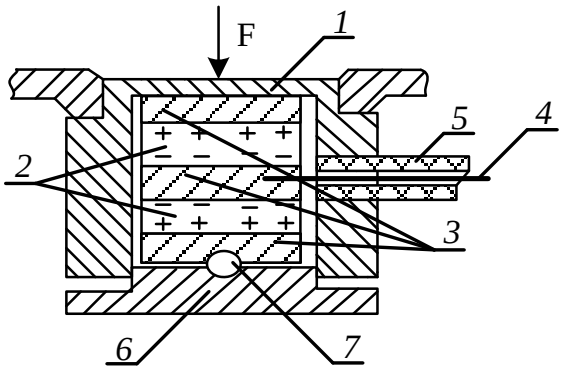


Рисунок 6.3 – Пьезоэлектрический датчик давления

На рис. 6.4 показан пьезоэлектрический датчик ускорения (*акселерометр*), используемый в виброизмерительной аппаратуре. Пьезоэлемент *1* из титаната бария расположен в корпусе прибора *2* между инерционной массой *3* и подпятником *4*. Для увеличения силы, действующей на пьезоэлемент при ускорениях, инерционная масса имеет относительно большие размеры и изготовлена из вольфрама. Пакет из инерционной массы *3*, пьезоэлемента *1* и подпятника *4* прижат к основанию корпуса гайкой *5* через сферическую пяту *6*, изоляционную прокладку, пружинную шайбу и контактную пластину.

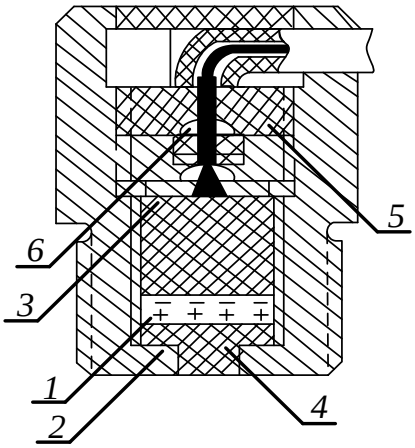


Рисунок 6.4 – Пьезоэлектрический датчик ускорения

Вывод сигнала выполнен с помощью специального антивибрационного кабеля. Датчик измеряет ускорения от 0,2 до 200 g. Коэффициент преобразования порядка 8 мВ на 1 g. Минимальная частота виброускорений 5 Гц.

6.4. Пьезорезистивные датчики

Пьезорезистивный эффект – наличие зависимости сопротивления материала от величины его деформации. Пьезорезистивный эффект обнаруживается у многих веществ, в том числе и у металлов.

В состав датчиков давления на его основе обязательно входят два компонента: пластина (мембрана) известной площади A и детектор, выходной сигнал которого пропорционален приложенной силе F. Оба эти элемента могут быть изготовлены из кремния. Датчик давления с кремниевой диафрагмой состоит из самой диафрагмы и встроенных в нее диффузионным методом пьезорезистивных преобразователей в виде резисторов. Поскольку монокристаллический кремний обладает очень хорошими характеристиками упругости, в таком датчике отсутствует текучесть и гистерезис даже при высоком давлении. Коэффициент тензочувствительности кремния во много раз превышает аналогичный коэффициент тонкого металлического проводника. Обычно пьезорезисторы включаются по схеме моста Уинстона. Максимальное выходное напряжение таких датчиков обычно составляет несколько сот милливольт, поэтому на их выходе, как правило, ставятся усилители сигналов. Кремниевые резисторы обладают довольно сильной зависимостью от температуры, поэтому всегда при разработке датчиков на их основе необходимо предусматривать цепи температурной компенсации.

Когда к полупроводниковому резистору номинала R прикладывается механическое напряжение, вследствие пьезорезистивного эффекта его сопротивление меняется на величину ΔR.

Датчики давления бывают трех типов, позволяющих измерять абсолютное, дифференциальное и манометрическое давление. Абсолютное давление, например, барометрическое, измеряется относительно давления в эталонной вакуумной камере, которая может быть как встроенной (рис. 6.5), так и внешней.

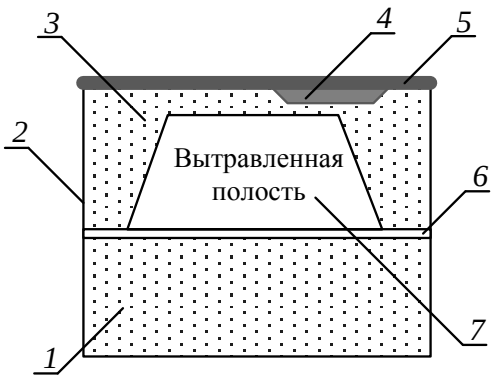


Рисунок 6.5 – Устройство корпуса датчика абсолютного давления:
1 – кремниевая неподвижная подложка; *2* – кремниевая подложка; *3* – диафрагма; *4* – диффузионный тензодатчик; *5* – металлизация; *6* – стеклянный герметик; *7* – герметичная эталонная камера

Дифференциальное давление, например, перепад давления в дифференциальных расходомерах, измеряется при одновременной подаче давления с двух сторон диафрагмы. Манометрическое давление измеряется относительно некоторого эталонного значения. Примером может служить, измерение кровяного давления, которое проводится относительно атмосферного давления. Манометрическое давление по своей сути является разновидностью дифференциального давления. Во всех трех типах датчиков используются одинаковые конструкции диафрагм и тензодатчиков, но все они имеют разные корпуса. Например, при изготовлении дифференциального или манометрического датчика, кремниевый кристалл располагается внутри камеры, в которой формируются два отверстия с двух сторон кристалла (рис. 6.6).

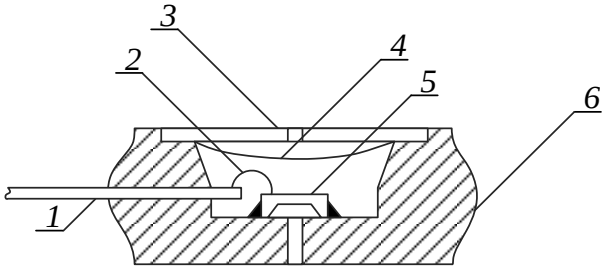


Рисунок 6.6 – Устройство корпуса датчика дифференциального давления:
1 – направляющая рамка; *2* – соединительный провод; *3* – крышка из нержавеющей стали; *4* – силиконовый гель; *5* – кристалл; *6* – кожух из термопластика

Для защиты устройства от вредного влияния окружающей среды внутренняя часть корпуса заполняется силиконовым гелем, который изолирует поверхность кристалла и места соединений, но позволяет

давлению воздействовать на диафрагму. Корпуса дифференциальных датчиков могут иметь разную форму. В некоторых случаях при работе с горячей водой, коррозионными жидкостями и т.д. необходимо обеспечивать физическую изоляцию устройства и гидравлическую связь с корпусом датчика. Это может быть реализовано при помощи дополнительных диафрагм и сильфонов. Для того чтобы не ухудшались частотные характеристики системы, воздушная полость датчика почти всегда заполняется силиконовой смазкой типа Dow Corning DS200.

Для всех кремниевых датчиков характерна зависимость их характеристик от температуры. Коэффициент температурной чувствительности таких датчиков обычно отрицательный, и для получения точных результатов его необходимо компенсировать.

Лекция 7. ДАТЧИКИ НА ЭФФЕКТЕ ХОЛЛА

7.1. *Основные характеристики и принципы действия датчиков Холла.*
7.2. *Конструкции датчиков Холла.*
7.3. *Прерыватели на датчиках Холла.*
7.4. *Датчик угловых перемещений на эффекте Холла.*

7.1. Основные характеристики и принципы действия датчиков Холла

Эффект Холла (открыт в 1879 г.) – явление связанное с возникновением поперечной разности потенциалов в пластине полупроводника и помещенной в магнитное поле, если в продольном направлении пластины протекает электрический ток (рис. 7.1).

Датчик Холла конструктивно представляет собой тонкую полупроводниковую пластину или пленку из Si, Ge, GaAs, InSb (антимонид индия), укрепленную (напыленную) на прочной подложке из диэлектрика (слюда, керамика), с четырьмя электродами. Два – для подведения тока, два – для съема ЭДС.

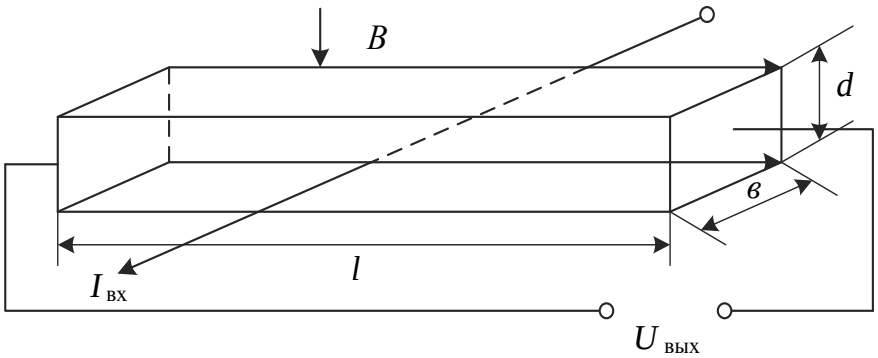


Рисунок 7.1 – К пояснению эффекта Холла

Выходное напряжение Холла:

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{х}} \cdot I_{\text{вх}} \cdot \frac{B}{d} \cdot f\left(B; \frac{l}{b}\right), \qquad (7.1)$$

где $K_{\text{х}}$ – коэффициент Холла; B – нормальная составляющая вектора магнитной индукции; $f\left(B; \frac{l}{b}\right)$ – функция, учитывающая зависимость выходного напряжения от соотношения геометрических размеров пластины и типа полупроводника.

Чувствительность датчика Холла γ – отношение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ к произведению входного тока $I_{\text{вх}}$ на нормальную

составляющую вектора индукции B:

$$\gamma = \frac{U_{\text{вых}}}{B \cdot I_{\text{вх}}}. \qquad (7.2)$$

Данный параметр зависит от температуры. С ростом температуры чувствительность падает.

Линейный датчик Холла обычно размещается в корпусе с четырьмя выводами. Два вывода для подключения тока управления называются управляющими выводами, а сопротивление между ними – сопротивлением управляющей цепи R_1. Выводы для измерения выходного напряжения называются дифференциальными выходами, а сопротивление между ними – выходным дифференциальным сопротивлением R_0. Эквивалентную схему датчика Холла (рис.7.2) можно представить в виде узлового соединения 4-х резисторов и двух источников напряжения, включенных последовательно с выходными выводами.

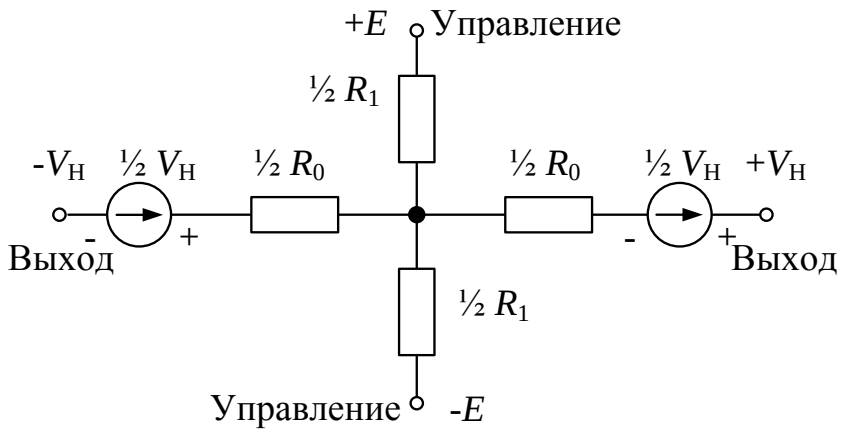


Рисунок 7.2 – Эквивалентная схема датчика Холла

Датчик характеризуется следующими параметрами: сопротивлениями R_1 и R_0, напряжением смещения при отсутствии магнитного поля, чувствительностью и температурным коэффициентом чувствительности.

Большинство датчиков Холла изготавливаются из кремния и других соединений (InSb, InAs, GaAs), и их можно разделить на две основные категории: простые и интегрированные. Датчики Холла могут быть интегрированы на одной подложке с интерфейсными электронными схемами. Такая интеграция особенно важна при построении прецизионных датчиков, поскольку напряжение Холла обычно довольно мало.

7.2. Конструкции датчиков Холла

Для возможности измерения положения и перемещения объектов датчику Холла необходим источник магнитного поля, а также интерфейсная схема. Магнитное поле характеризуется двумя основными параметрами: плотностью потока и полярностью (направленностью). Следует отметить, что для повышения чувствительности желательно, чтобы линии магнитного поля были перпендикулярны плоской поверхности датчика и имели заданную направленность. В пороговых датчиках фирмы Sprague южный полюс магнита отвечает за переключение датчика, в то время как северный полюс не оказывает никакого влияния.

Существуют два типа ИМС датчиков Холла: *линейный* и *пороговый* (рис. 7.3). Линейный датчик обычно интегрируется вместе с усилителем для упрощения согласования с последующими схемами. По сравнению с основным датчиком они работают в большем диапазоне напряженности поля и обладают более хорошей помехозащищенностью. Но эти датчики не отличаются хорошей линейностью зависимости выходного напряжения от плотности магнитного поля (рис. 7.4, *а*), поэтому для получения точных результатов необходимо проводить их индивидуальную калибровку. В дополнение к усилителю в состав порогового датчика входит триггер Шмитта, обладающий гистерезисом. На рис.7.4, *б* показана зависимость выходного сигнала порогового датчика от плотности магнитного поля. Когда плотность приложенного магнитного поля превышает заданный пороговый уровень, триггер переключается из состояния ВЫКЛ в положение ВКЛ, что свидетельствует о критическом приближении объекта к детектору. Гистерезис за счет введения «мертвой зоны», запрещающей работу датчика после прохождения порогового значения, устраняет паразитные колебания.

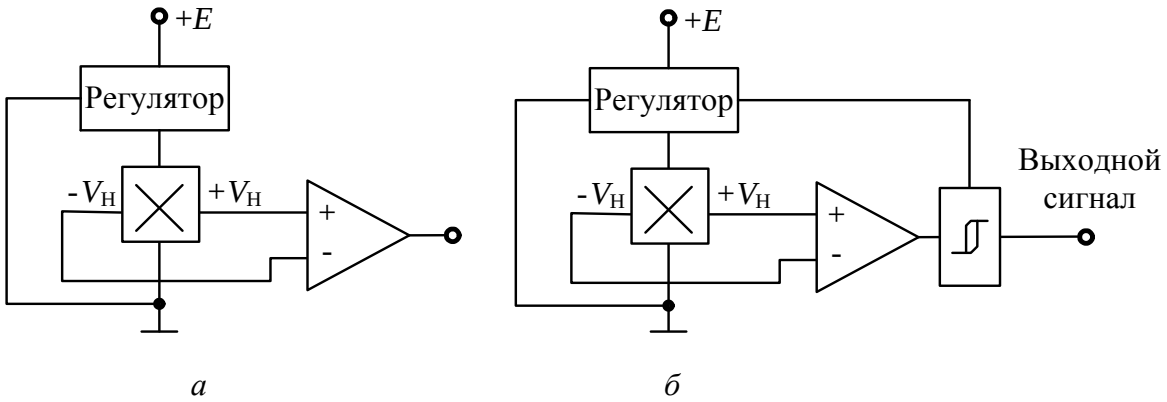


Рисунок 7.3 – Схемы линейного *а* и порогового *б* датчика Холла

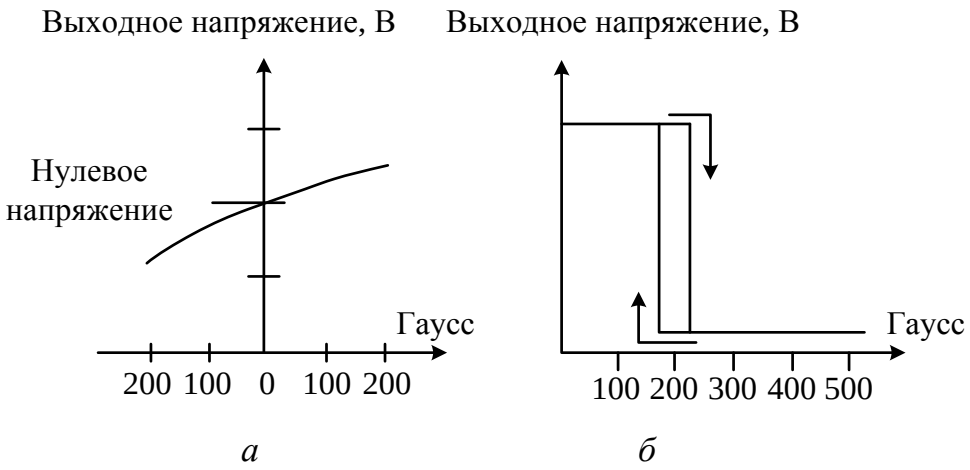


Рисунок 7.4 – Передаточные функции линейного *а* и порогового *б* датчика Холла

Для датчика Холла порогового типа максимальное расстояние, при котором происходит переход выходного сигнала датчика из состояния ВКЛ (ВЫСОКИЙ УРОВЕНЬ) в состояние ВЫКЛ (НИЗКИЙ УРОВЕНЬ), называется точкой отпускания. Эта точка определяет критическое расстояние, на котором может работать датчик. Зависимость силы магнитного поля от расстояния не является линейной. Эта зависимость во многом определяется формой используемых магнитов. Магнитным контуром и траекторией перемещения магнита.

7.3. Прерыватели на датчиках Холла

Датчики Холла могут использоваться в качестве *детекторов прерывания магнитного поля*. В этом случае датчик Холла и магнит представляют собой единый блок с небольшим воздушным зазором между ними (рис. 7.5). Часто вся конструкция монтируется в одном корпусе, что помогает устранить процедуру выравнивания элементов друг относительно друга. При свободном воздушном зазоре датчик находится в положении ВКЛ. Когда в пространство между магнитом и датчиком помещается ферромагнитная пластина, она формирует магнитный шунт, закорачивающий магнитный поток на себя, в результате чего детектор Холла переходит в состояние ВЫКЛ. Ферромагнитная пластина, разрывающая магнитный поток, может совершать либо линейные, либо вращательные движения. Примером такого устройства является автомобильный прерыватель.

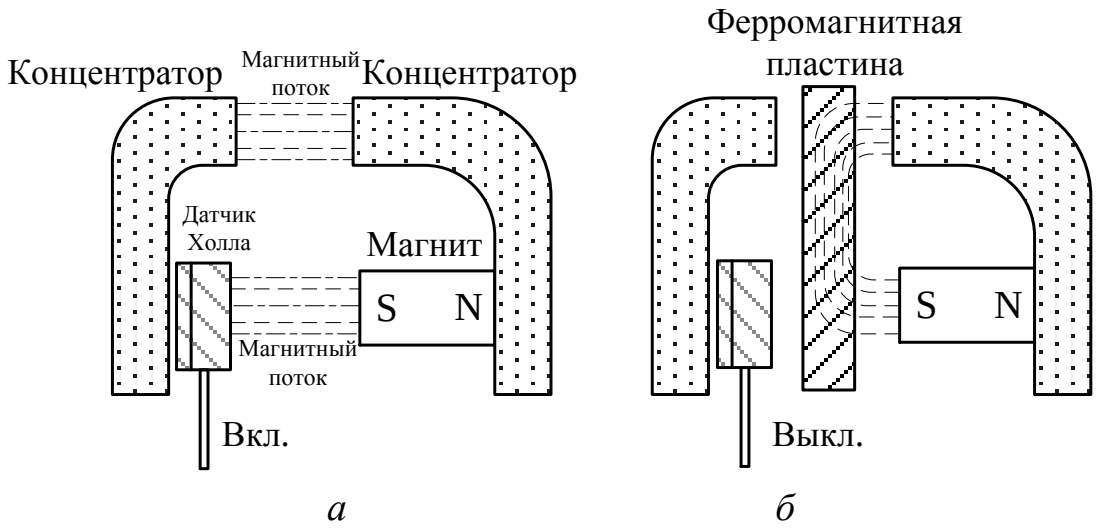


Рисунок 7.5 – Прерыватель, реализованный на основе датчика Холла:
а – магнитный поток включает датчик, *б* – магнитный поток шунтируется ферромагнитной пластиной

7.4. Датчик угловых перемещений на эффекте Холла

Для детектирования *линейных и круговых перемещений* четыре датчика Холла включаются в мостовую схему. На рис. 7.6 показан внешний вид и принципиальная схема мостового датчика Холла для измерения угловых перемещений, изготовленного на одном кристалле по микросистемной технологии в пластмассовом корпусе SOIC-8. Схема детектирует угол и направление поворота кругового магнита, размещенного сверху кристалла, и преобразует полученные данные в цифровой код. Такое устройство позволяет точно определять линейное и угловое положение объекта, выполнять *угловую кодировку* и даже реализовать управляемый поворотный переключатель. Благодаря мостовой схеме включения датчиков, вся система устойчива к смещениям магнита и внешним помехам, включая посторонние магнитные поля.

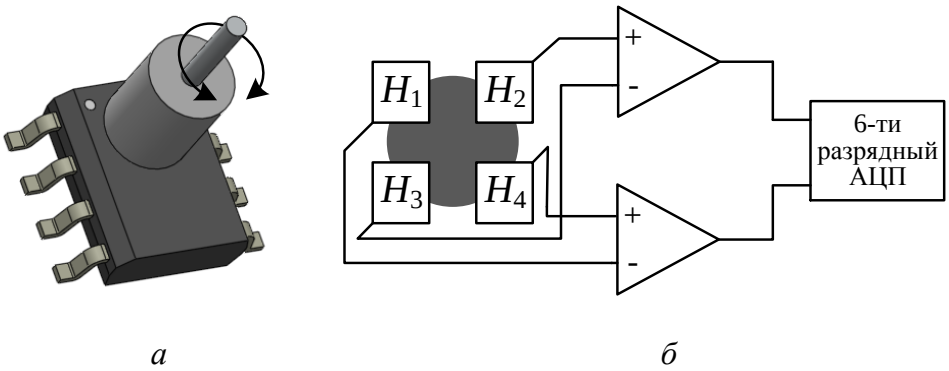


Рисунок 7.6 – Мостовой датчик Холла *а* и его внутренний интерфейс *б*

Лекция 8. ТЕРМОПАРЫ

8.1. *Общие сведения и принцип действия.*
8.2. *Материал для электродов термопар.*
8.3. *Подключение термопар.*
8.4. *Схемы подключения термопар.*

8.1. Общие сведения и принцип действия

Принцип действия таких датчиков основан на эффекте Зеебека. Суть эффекта состоит в следующем: если взять проводник, и один его конец поместить в холодное место, а другой – в теплое, от теплого участка к холодному будет передаваться тепловая энергия. Интенсивность теплового потока при этом пропорциональна теплопроводности проводника. При этом тепло поглощается, если ток и тепловой поток направлены в противоположных направлениях, и выделяется – когда они имеют одинаковое направление. Индуцированное электрическое поле приводит к появлению разности потенциалов:

$$dV_a = \alpha_a \frac{dT}{dx} dx, \tag{8.1}$$

где dT – градиент температуры на небольшом участке длины dx, а α_a – абсолютный коэффициент Зеебека материала. Если материал однородный, α_a не зависит от его длины, и уравнение (8.1) принимает вид:

$$dV_a = \alpha_a dT. \tag{8.2}$$

Уравнение (8.2) является основным математическим выражением для термоэлектрического эффекта.

При соединении двух проводников происходит следующее: свободные электроны в металле ведут себя как идеальный газ. Кинетическая энергия электронов определяется температурой материала. Однако в разных металлах энергия и плотность свободных электронов не являются одинаковыми. Когда два разных материала, находящихся при равной температуре, соприкасаются друг с другом, свободные электроны за счет диффузии перемещаются через место соединения. Электрический потенциал материала, принявшего электроны, становится более отрицательным, а материал, отдавший электроны – более положительным. Разные концентрации электронов с двух сторон соединения формируют электрическое поле, уравновешивающее процесс диффузии, в результате чего устанавливается некоторое равновесие. Если контур является замкнутым, и оба соединения находятся при одинаковой температуре,

электрические поля около них взаимно уничтожаются, чего не происходит, когда места соединений имеют разную температуру.

Последующие исследования показали, что эффект Зеебека является электрическим по своей природе. Можно утверждать, что термоэлектрические свойства проводников – это такие же объёмные свойства материалов, как электро- и теплопроводность, а коэффициент α_a – уникальная характеристика материала. При комбинировании двух разных материалов (А и В) всегда требуется определять напряжение Зеебека. Это можно сделать при помощи дифференциального коэффициента Зеебека:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B. \tag{8.3}$$

Тогда напряжение на соединении равно:

$$dV_{AB} = \alpha_{AB} dT. \tag{8.4}$$

Уравнение (8.4) иногда применяется для определения дифференциального коэффициента:

$$\alpha_{AB} = \frac{dV_{AB}}{dT}. \tag{8.5}$$

Например, функцию напряжения от градиента температуры для термопары Т- типа можно с достаточной степенью точности аппроксимировать при помощи уравнения второго порядка:

$$V_{AB} = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 = -0{,}0543 + 4{,}094 \cdot 10^{-2} T + 2{,}874 \cdot 10^{-5} T^2. \tag{8.6}$$

Тогда выражение для дифференциального коэффициента Зеебека принимает следующий вид:

$$\alpha_{\text{т}} = \frac{dV_{AB}}{dT} = \alpha_1 + 2\alpha_2 T = 4{,}094 \cdot 10^{-2} + 5{,}748 \cdot 10^{5} T. \tag{8.7}$$

Из уравнения видно, что коэффициент является линейной функцией от температуры. Иногда он называется чувствительностью термопарного соединения. Эталонное соединение, которое, как правило, находится при более холодной температуре, называется *холодным спаем*, а второе соединение – *горячим спаем*. Коэффициент Зеебека не зависит от физической природы соединения: металлы могут быть скручены, сварены, спаяны и т.д. Имеет значение только температура спаев и свойства металлов. Эффект Зеебека является прямым преобразованием тепловой энергии в электрическую.

У любой пары проводников термо- ЭДС зависит только от материалов и температуры спаев.

Поскольку термоэлектрические контактные датчики состоят, по крайней мере, из двух разных проводников и двух соединений (пар) этих

проводников, их часто называют *термопарами*. Они являются генераторными датчиками, т.к. сами вырабатывают напряжение в ответ на изменение температуры и не требуют для этого внешнего источника питания. Термопары относятся к классу относительных датчиков, поскольку их выходное напряжение определяется разностью температур между двумя спаями и практически не зависит от абсолютной температуры каждого соединения. При измерении температуры при помощи термопары один ее спай служит эталоном, и его температуру необходимо определять при помощи отдельного детектора абсолютной температуры, например, термистора, РДТ и т.д. или его надо поместить в материал, находящийся в физическом состоянии, температура которого точно известна.

8.2. Материал для электродов термопар

На практике наиболее часто используют следующие типы термопар в зависимости от материалов изготовленных электродов.

Тип *T*: Cu (+) и константан (–). Такие термопары устойчивы к коррозии (поэтому могут применяться для работы во влажной атмосфере) и пригодны для измерения отрицательных температур. При работе на воздухе в агрессивной среде их верхний предел рабочего диапазона ограничен 370 °С, что связано с окислением медного элемента. В других окружающих условиях термопары типа *T* могут использоваться при более высоких температурах.

Тип *J*: Fe (+) и константан (–). Термопары этого типа подходят для работы в вакууме, а также в различных средах: и инертных, и окислительных, и восстановительных. Их рабочий температурный диапазон лежит в интервале 0…760 °С. При температуре около 540 °С начинается быстрый процесс окисления железных термоэлементов. Если требуется, чтобы термопары работали длительное время в условиях высоких температур, для их изготовления необходимо применять провода с большим поперечным сечением. Термопары типа *J* не рекомендуется использовать для измерения температур ниже точки замерзания воды из-за их хрупкости и подверженности ржавлению. В этом температурном диапазоне лучше работают термоэлементы типа *T*.

Тип *E*: 10 % Ni / Cr (+) и константан (–). Эти термопары рекомендуется использовать в температурном диапазоне –200…900 °С в окислительных или инертных атмосферах. В восстановительной атмосфере и в вакууме они имеют те же ограничения, что и термопары типа *K*. Термопары типа *E* могут применяться для измерения отрицательных

температур, благодаря тому, что они не подвержены коррозии при работе в атмосфере с повышенным содержанием влаги. Они способны вырабатывать наибольшую среди всех известных типов термопар ЭДС, поэтому термоэлементы типа *E* являются самыми популярными.

Тип *K*: 10 % Ni / Cr (+) и 5 % Ni / Al / Si (–). Такие термопары применяются для работы в окислительной и полностью инертных средах для измерения температур в диапазоне –200…1260 °С. Благодаря своей устойчивости к окислению их часто используют при температурах выше 540 °С. Однако термопары типа *K* нельзя применять в восстановительных и сернистых атмосферах, а также в вакууме.

Тип *R* и *S*: Pt / Rh (+) и Pt (–). Эти термопары предназначены для непрерывной работы в окислительной и инертной среде в температурном диапазоне 0…1480 °С.

Тип *B*: Pt / Rh (+) и 6 % Pt / Rh (–). Термопары типа *B* подходят для непрерывной работы в окислительной и инертной атмосфере в температурном диапазоне 870…1700 °С. Их также можно использовать для проведения кратковременных измерений в вакууме. Такие термопары не рекомендуется применять в восстановительной среде, содержащей пары металлов и неметаллов. Их нельзя вставлять в металлические защитные корпуса или чехлы.

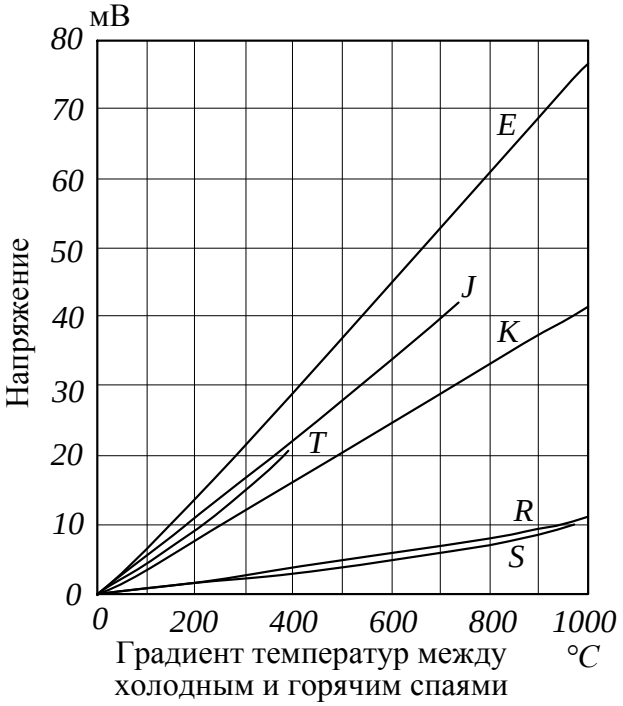


Рисунок 8.1 – Зависимость выходного напряжения стандартных термопар от градиента температур между холодным и горячим спаями

8.3. Подключение термопар

Для практического использования термопар необходимо знать три основных закона, устанавливающих правила их подключения. Следует подчеркнуть, что интерфейсные электронные схемы всегда должны подсоединятся к двум идентичным проводникам. Эти проводники, как правило, формируют одно из плечей термопарного контура, используемого для подключения измерительного устройства. На рис. 8.2, *а* это плечо обозначено как А.

1. Явление термоэлектричества характерно только для неоднородных электрических цепей.

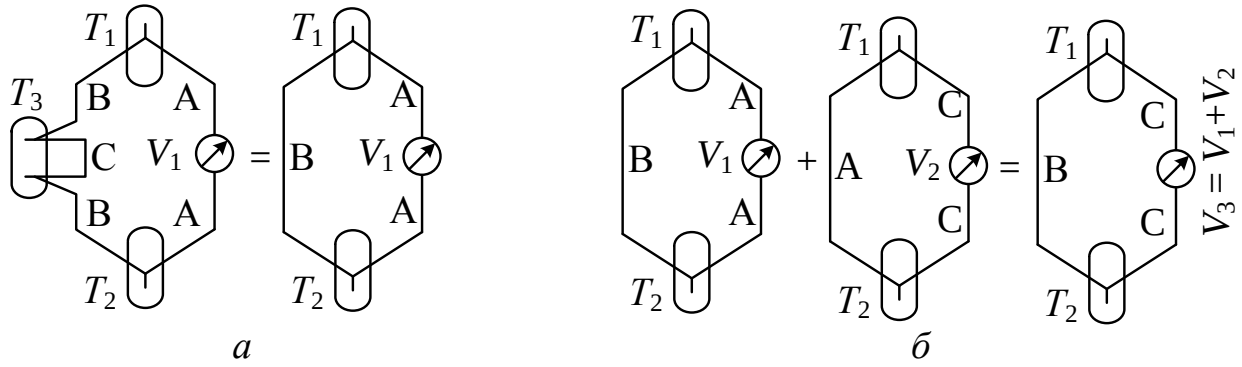


Рисунок 8.2 – Иллюстрации правил соединения термопар

Отсюда следует, что для получения разности потенциалов Зеебека необходимо использовать неоднородный материал. В случае однородного проводника при любом распределении температуры вдоль его длины результирующее напряжение будет всегда нулевым. Соединение двух разных проводников обеспечивает возникновение термо- ЭДС.

2. Алгебраическая сумма всех термо- ЭДС цепи, состоящей из любого количества термопар (соединений разных материалов), будет всегда равна нулю, если все соединения находятся при одинаковой температуре.

Это значит, что в любое плечо термоэлектрического контура можно внести дополнительный материал С, не боясь изменить результирующее напряжение V_1 при условии, что оба новых соединения будут иметь одинаковую температуру (T_3 на рис. 8.2).

3. Если два соединения разных материалов, находящихся при температурах T_1 и T_2 вырабатывают термо- ЭДС V_2, а при температурах T_2 и T_3 результирующая термо- ЭДС равна V_1, то при температурах T_1 и T_3 выходное напряжение V_3 определяется суммой двух термо- ЭДС V_1 и V_2 (рис. 8.2, *б*).

8.4. Схемы подключения термопар

В прошлом холодные спаи термопар опускались в сосуды с тающим льдом для поддержания их температуры, равной 0 °С (отсюда появилось название «холодные» спаи). Несмотря на высокую точность таких конструкций, для многих практических схем это невозможно. С другой стороны холодный спай может находится при любой температуре, даже при температуре окружающей среды, единственное условие: значение этой температуры должно быть известно. Поэтому часто для измерения температуры холодного спая используется дополнительный детектор (например, терморезистивный или полупроводниковый) без компенсационных цепей (рис. 8.3).

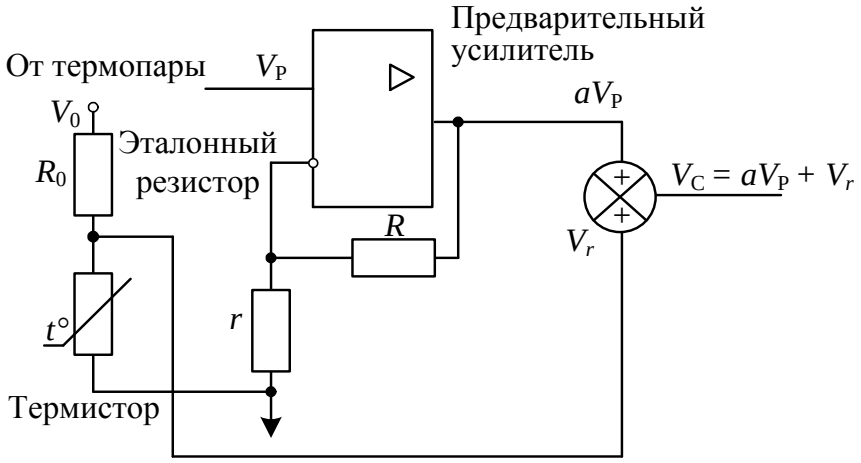


Рисунок 8.3 – Суммирование сигналов термистора и термопары

Термопарная сборка обычно состоит из следующих компонентов: чувствительного элемента (спая), защитной трубки (керамической или металлической оболочки), теплосборника (необходимого элемента прецизионных датчиков, изготавливаемого в виде просверленного стержня, хорошо отполированного с целью снижения коррозии) и выводов (контактов, имеющих разную форму соединения: скрученного типа, разомкнутого типа, в виде разъёмов и т.д.). Проводники остаются либо оголенными, либо покрываются изоляционным материалом. Для работы в условиях высоких температур используются керамические изоляторы, обладающие достаточной гибкостью. Проводники термопар без электрической изоляции могут быть источниками измерительных погрешностей.

Лекция 9. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ДАТЧИКИ

9.1. *Понятие и характеристики ультразвука.*
9.2. *Получение ультразвука.*
9.3. *УЗ измеритель расстояния.*
9.4. *Ультразвуковые расходомеры.*

9.1. Понятие и характеристики ультразвука

Ультразвук – это упругие волны и упругие колебания с частотами $2\cdot10^4 \div 2\cdot10^9$ Гц.

Источниками ультразвука являются механические и электромеханические излучатели.

В общем случае звуковые волны делят на диапазоны частот в Гц:

- 0÷16 Гц – инфразвук;
- 16÷20000 Гц – слышимые звуки;
- $2\cdot10^4 \div 2\cdot10^9$ Гц – ультразвук;
- $> 10^9$– гиперзвук.

Звуковые колебания, возбуждённые в одной точке, распространяются в среде в виде упругих волн. Это чередование областей сжатия и разряжения

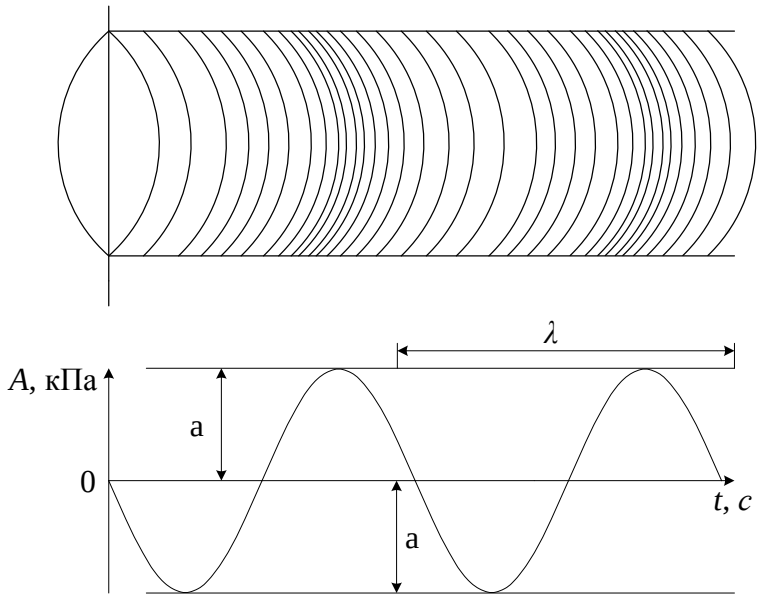


Рисунок 9.1 – Распространение звуковой волны в среде

Скорость распространения волн зависит от свойств среды. Распространение волн идет по законам акустики. Частота колебаний:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}, \quad \omega = 2\pi f, \tag{9.1}$$

где ω – круговая частота (частота колебаний за 2π).

Если начало колебаний было при $t = 0$, то в любой момент времени t амплитуда равна:

$$A=A_0 \cdot \sin(\omega t)=A_0 \cdot \sin(2\pi ft). \quad (9.2)$$

Скорость колеблющейся материальной точки:

$$V_к = \frac{dx}{dt} = A_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t). \quad (9.3)$$

Наибольшее значение колебательной скорости:

$$V_к = \omega \cdot A = 2\pi fA. \quad (9.4)$$

Длина волны (расстояние, проходимое за один период колебания):

$$\lambda = \frac{C_з}{f}, \quad (9.5)$$

где $C_з$ – скорость звука в этой среде.

Звук распространяется во всех средах: газах, жидкостях, твердых веществах.

Интенсивность ультразвуковых колебаний измеряется в эрг/см^2·с или Вт/см^2.

При прохождении через однородную среду имеет место затухание сигнала. При переходе из одной среды в другую на границе раздела происходит *преломление и отражение* части сигнала обратно. Коэффициент отражения β равен:

$$\beta = \left(\frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \right)^2, \quad (9.6)$$

где z_1 и z_2 – удельные акустические сопротивления первой и второй среды.

9.2. Получение ультразвука

Устройства, излучающие УЗ называют ультразвуковыми излучателями. Которые их принимают – УЗ приемниками. Излучатели бывают механическими, электромеханическими, пьезоэлектрическими и магнитострикционными.

К механическим относят: УЗ свистки, сирены и т.д. Они работают при частотах 20÷500 кГц в жидкостях, воздухе, газах. Их общий недостаток – сложность изготовления.

Электромеханические (взаимодействие проводника с током) применяются редко, из-за сложности изготовления.

Магнитострикционные – на эффекте магнитострикции. При пропускании переменного тока по обмотке, наложенной на ферромагнитный стержень, стрежень изменяет свои размеры с частотой поля – прямой магнитострикционный эффект. Если такой стержень сжимать и разжимать, то в надетой обмотке возникает переменный ток с частотой сжатий – обратный магнитострикционный эффект (рис. 9.2).

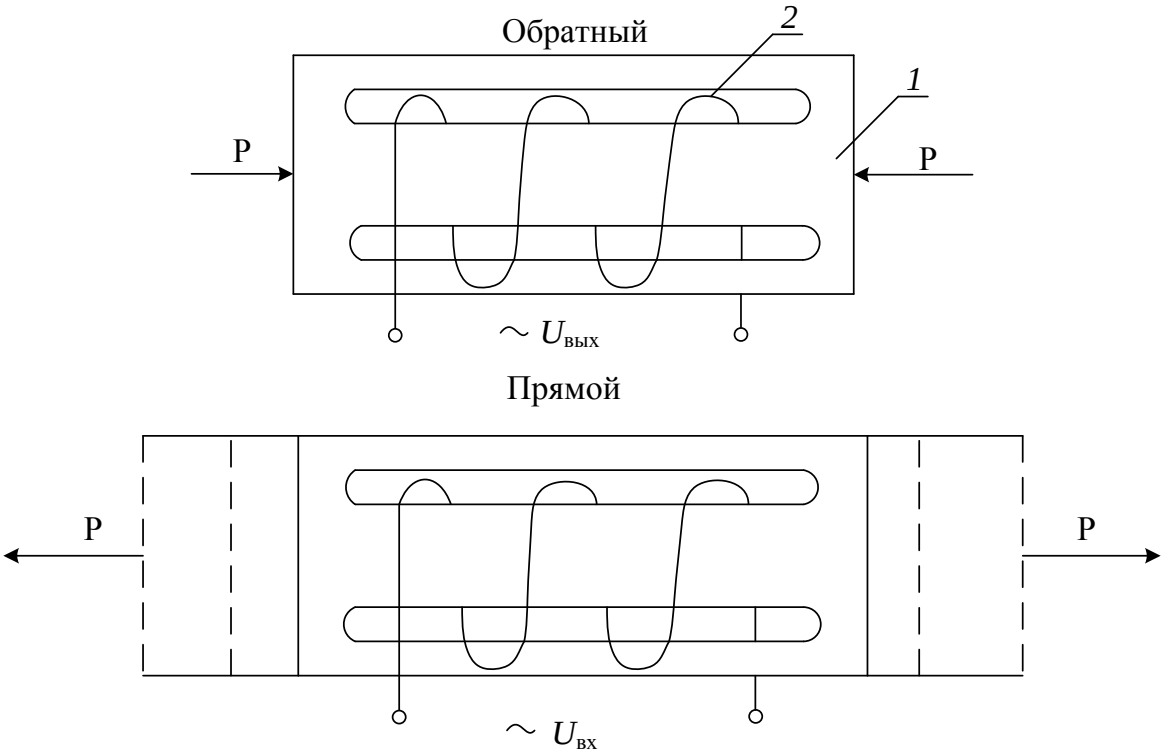


Рисунок 9.2 – Прямой и обратный магнитострикционный эффекты:
1 – магнитопровод; *2* – проводник

В качестве материалов используют сплав железа с платиной (Pt – 32 %, Fe – 68 %); чистый никель Ni; сплав пермендюр (кобальт + ванадий Co+V); ферриты и др.

Обычно магнитострикционный преобразователь – это набор (пакет) тонких пластин 0,1÷0,2 мм каждая, которые изолирую друг от друга лаком.

В связи со сложностью изготовления сердечника, в настоящее время широко не применяется.

Пьезоэлектрический излучатель – работает на пьезоэлектрическом эффекте (1880 г. Жак и Пьер Кюри).

Применяют титанат бария ($BaTi_2$). Его получают искусственным путём. Эффект у $BaTi_2$ в 50 раз сильнее, чем у SiO_2, а стоимость в 100 раз меньше. Используют титанат свинца ($PbTi_2$).

9.3. УЗ измеритель расстояния

Принцип действия таких устройств основан на измерении времени прохождения звуковой волны до объекта и обратно (см. рис 9.3).

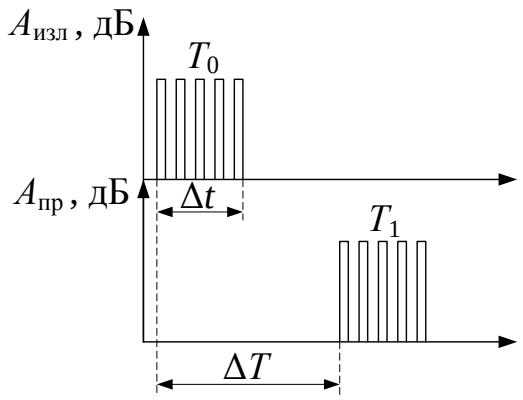


Рисунок 9.3 – К пояснению принципа измерения расстояния

В момент T_0 устройством излучается пачка импульсов длительностью Δt, которая распространяется в среде со скоростью звука $C_з$. Часть сигнала возвращается к излучателю (в приёмник) после отражения от объекта в момент T_1. Расстояние до объекта может быть определено по формуле

$$S = (T_1 - T_0) \cdot C_з / 2. \qquad (9.7)$$

Используют схемы с одной головкой (совмещенная схема) (рис. 9.4) или с двумя разными головками (раздельно-совмещенная схема) (рис. 9.5).

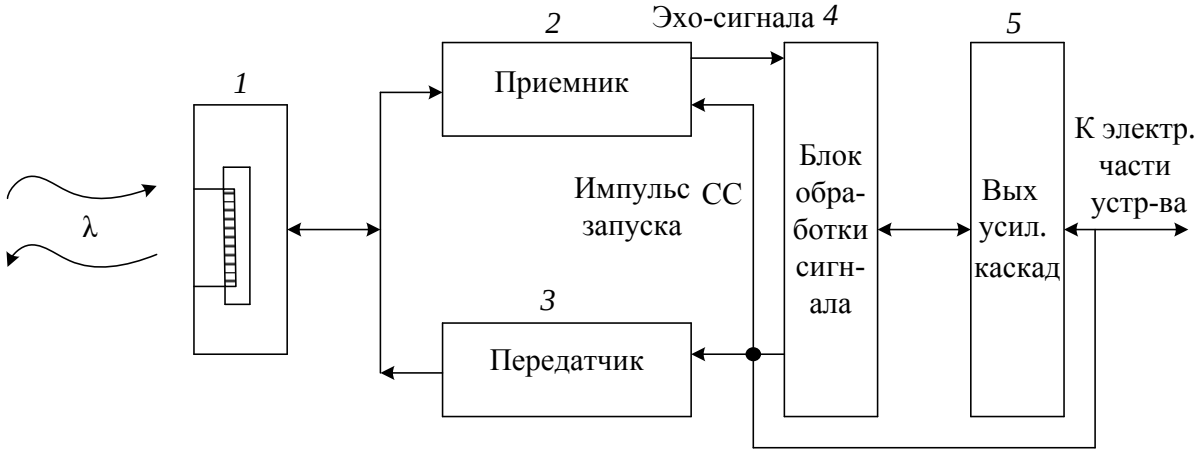


Рисунок 9.4 – Схема измерителя с совмещённой схемой:
1 – УЗ преобразователь; *2* – приёмник; *3* – передатчик;
4 – блок обработки сигнала; *5* – выходные усилительные каскады

Существенный недостаток в том, что после излучения импульсов нужно время, прежде чем мембрана излучателя успокоится. Это «мёртвое» время датчика МВ.

Пусковой импульс активирует систему возбуждения передатчика и блокирует приёмник. Затем блокируется излучатель и восстанавливается приёмник.

Электронная часть фиксирует время T_1-T_0 и формирует выходной сигнал, пропорциональный ΔT.

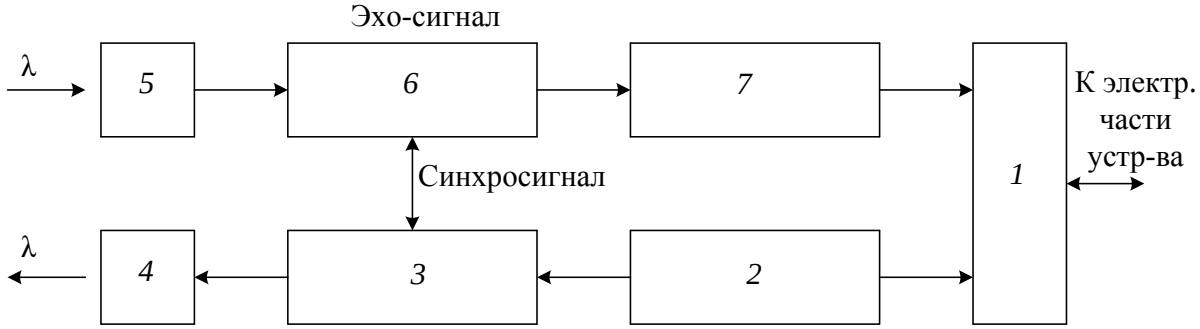


Рисунок 9.5 – Схема измерителя с раздельно-совмещенной схемой:
1 – выходные каскады; *2* – блок генерации; *3* – усилитель;
4 – излучатель; *5* – приёмник; *6* – блок обработки входного сигнала;
7 – усилитель-преобразователь

При двух головках очень важен подбор пьезоэлементов излучателя и приёмника по резонансной частоте.

9.4. Ультразвуковые расходомеры

Характеристики потоков могут быть определены при помощи ультразвуковых волн. Основная идея заключается в детектировании изменения частоты или сдвига фаз, вызываемых подвижной средой. Ультразвуковые датчики реализуются на основе либо *эффекта Доплера*, либо определения изменений *эффективной скорости* ультразвука в среде. Эффективная скорость звука в подвижной среде равна скорости звука в этой среде плюс скорость среды относительно источника звука. Таким образом, распространение звуковой волны против потока среды приведет к уменьшению эффективной скорости звука, а вдоль потока – к увеличению. Разность между этими двумя эффективными скоростями звука равна удвоенной скорости потока среды. Поэтому ультразвуковые датчики для определения скорости потока измеряют скорость звука вдоль и против течения.

На рис. 9.6, *а* показаны два ультразвуковых генератора, расположенные на двух противоположных сторонах трубы, по которой течет поток жидкой среды. В качестве ультразвуковых генераторов, как правило, используются пьезоэлектрические кристаллы. Каждый кристалл может использоваться либо для возбуждения ультразвуковых волн, либо для их приема. Другими словами, один и тот же кристалл при необходимости работает и как излучатель, и как приемник.

Кристаллы расположены на расстоянии D друг от друга под углом θ по отношению к направлению потока. Также возможно располагать небольшие кристаллы прямо внутри трубы строго по направлению потока (θ =0). Время распространения звука между двумя кристаллами А и В связано со средней скоростью потока v_c следующим соотношением:

$$T = \frac{D}{c \pm v_c \cos\theta}, \tag{9.8}$$

где c – скорость звука в среде. Знак ± означает направление распространения звука: вдоль потока или против него. Скорость v_c – это скорость потока, усредненная вдоль пути распространения ультразвука. Гесснер показал, что для ламинарного потока $v_c = 4v_a/3$, а для турбулентного – $v_c = 1{,}07v_a$ – средняя скорость потока через поперечное сечение.

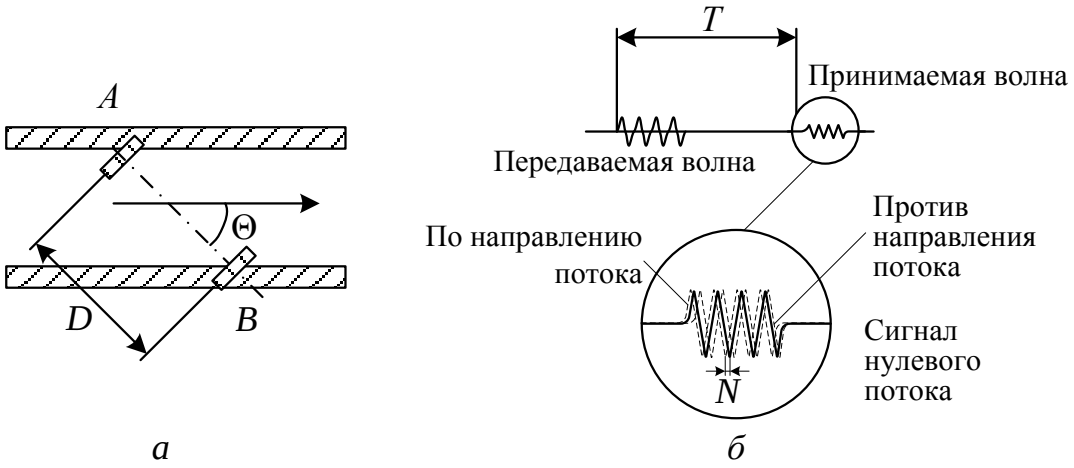


Рисунок 9.6 – Ультразвуковой расходомер:
а – положение приемно-передающих кристаллов в потоке среды;
б – форма звуковых волн

Определив разность между скоростями звука вдоль и против течения потока, можно найти, что:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot D \cdot v_c \cdot \cos\theta}{c^2 + v_c \cos^2\theta} \approx \frac{2 \cdot D \cdot v_c \cdot \cos\theta}{c^2}. \tag{9.9}$$

Это выражение справедливо для большинства случаев, когда $c >> v_c \cos\theta$. Для улучшения отношения сигнал/шум время распространения ультразвукового сигнала часто измеряется в двух направлениях, при этом оба пьезокристалла работают попеременно то приемниками, то передатчиками. Это можно реализовать при помощи переключательного устройства, показанного на рис. 9.7, который работает со сравнительно низкой частотой (например, 400 Гц). Синусоидальные ультразвуковые волны (с частотой около 3 МГц) передаются в импульсном режиме с той же самой медленной тактовой частотой (400 Гц). Принятый ВЧ сигнал отстает от переданного на время T. Величина этой задержки зависит от скорости потока среды (рис. 9.6, *б*). время T измеряется при помощи времяпролетного детектора, а синхронный детектор используется для определения разницы времен ΔT, затраченных на распространение сигнала вдоль и против течения потока. Такой ультразвуковой датчик обладает достаточно высокой точностью, его дрейф нуля составляет $5 \cdot 10^{-3}$ м/с^2 в течение 4-х часового интервала времени.

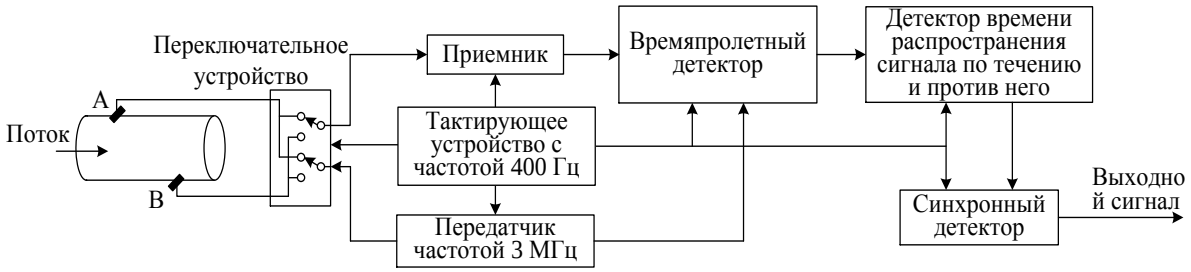


Рисунок 9.7 – Схема ультразвукового расходомера, в котором каждый кристалл играет роль и передатчика, и приемника

Альтернативный способ измерения расхода при помощи ультразвуковых датчиков заключается в определении разности фаз между переданным и принятым импульсным сигналом. Выражение для разности фаз можно вывести из уравнения (9.9)

$$\Delta\varphi = \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot D \cdot v_c \cdot \cos\theta}{c^2}, \qquad (9.10)$$

где f – частота ультразвукового сигнала. Очевидно, что чем выше частота, тем лучше чувствительность датчика. Однако при повышении частоты усиливается ослабление звука в системе, что может привести к снижению отношения сигнала/шум.

В доплеровских расходомерах используется непрерывное излучение ультразвуковых волн. На рис. 9.8 показан расходомер, в котором

излучатель и приемник расположены внутри потока. Также как и в доплеровском радиоприемнике здесь происходит сложение частот излученного и принятого сигналов. Для этого в схему включен нелинейный элемент – *смеситель*. Полосовой фильтр служит для ослабления ненужных гармоник выходного низкочастотного сигнала. Частота выходного сигнала определяется выражением:

$$\Delta\varphi = f_s - f_r \approx \pm\frac{2\cdot f_s\cdot v}{c}, \qquad (9.11)$$

где f_s и f_r – частоты излучающего и принимающего кристаллов, а знак ± относится к разным направлениям потока. Из выражения (9.11) видно, что разность частот прямо пропорциональна скорости потока. Очевидно, что размеры кристаллов должны быть гораздо меньше поперечного сечения трубы, в которой измеряется скорость потока. Поэтому измеренная скорость является не средней, а локальной скоростью потока. На практике всегда требуется калибровать ультразвуковые датчики во всем температурном диапазоне для каждой конкретной среды и также требуется учитывать вязкость исследуемой жидкости.

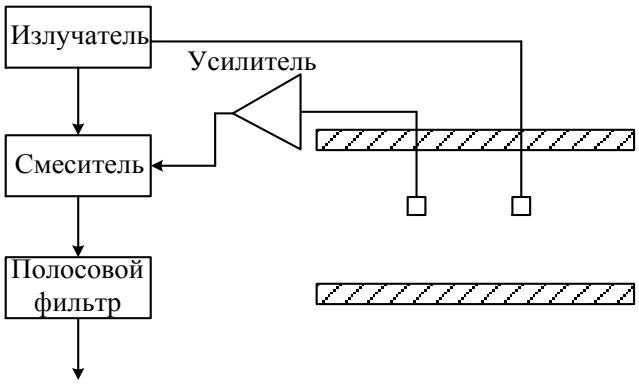


Рисунок 9.8 – Ультразвуковой доплеровский расходомер

Ультразвуковые пьезоэлектрические преобразователи изготавливаются в виде небольших керамических дисков, встроенных в корпус расходомера. Поверхность кристалла покрывается защитным материалом (например, силиконовой резиной). Достоинство ультразвукового датчика заключается в его способности измерять поток без прямого контакта с жидкостью.

Лекция 10. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

10.1. *Общие сведения.*
10.2. *Датчики положения.*
10.3. *Решетчатые датчики перемещения.*
10.4. *Поляризационный детектор приближения.*
10.5. *Волоконооптические датчики приближения.*
10.6. *Датчики Фабри-Перо.*
10.7. *Оптические гироскопы.*
10.8. *Флуоресцентные датчики температуры.*

10.1. Общие сведения

Принцип действия основан на различных оптических эффектах (отражение, преломление, поляризация и т.д.)

В состав оптического датчика, как правило, входят три компонента: источник света, фотодетектор и устройства, управляющие светом.

В качестве источников света обычно используются следующие приборы:

- *Светоизлучающий диод*. Это полупроводниковый прибор с электронно-дырочным переходом, создающий оптическое излучение при пропускании через него электрического тока в прямом направлении. Излучаемый светодиодом свет лежит в узком диапазоне спектра.
- *Лазерный диод*. Полупроводниковый лазер, построенный на базе диода. Его работа основана на возникновении инверсной населённостей в области p-n перехода при инжекции носителей заряда.

В качестве фотодетектора могут быть использованы:

- *Фоторезистор* – полупроводниковый прибор, изменяющий величину своего сопротивления при облучении светом.
- *Фотодиод* – полупроводниковый прибор, который преобразует оптическое излучение, попавшее на его фоточувствительную область, в электрический заряд, за счёт поглощения энергии в p-n-переходе. Его работа основана на фотоэлектрическом эффекте.
- *Фототранзистор* – оптоэлектронный полупроводниковый прибор, вариант биполярного транзистора. Отличается от классического варианта тем, что область базы доступна для светового облучения, за счёт чего появляется возможность управлять усилением электрического тока с помощью оптического излучения.

10.2. Датчики положения

После механических контактных и потенциометрических датчиков оптические детекторы являются наиболее популярными устройствами для определения положения и перемещений объектов. Среди их основных достоинств можно назвать простоту, отсутствие нагрузочного эффекта и относительно большие рабочие расстояния. Они нечувствительны к паразитным магнитным полям и электростатическим помехам, что делает их незаменимыми для многих приложений. Существующие практические схемы построения оптических датчиков положения и детектирования движения могут быть разделены на два основных типа:

- *щелевой* (на прерывание);
- *рефлекторный* (на отражение).

На рис. 10.1, *а* приведена конструкция типичного щелевого оптического переключателя-оптопрерывателя, или оптрона. В пластмассовом корпусе расположен фотоизмеритель (светодиод) и фотодетектор (фототранзистор), разделенные воздушным зазором в теле корпуса. Свет от светодиода попадает на фототранзистор, который переходит в состояние насыщения. Если в зазоре появляется непрозрачный элемент – ротор, путь света между светодиодом и фототранзистором блокируется, что вызывает переключение выхода фототранзистора к высокому уровню.

Светодиоды могут функционировать как в видимом, так и в инфракрасном спектре. Для работы датчика необходимо, чтобы конструкция корпуса и ширина элементов ротора обеспечивали чередование светопередачи и перекрытия оптического канала. Существенно уменьшить ширину оптических кодовых элементов и повысить разрешение устройства позволяют лазерные диоды. Расстояние от датчика до детектируемого объекта в пределах ширины рабочего зазора несущественно, но если необходим больший рабочий диапазон, также применяются лазерные светодиоды.

Простейшим примером может служить проверка с помощью оптического оптопрерывателя открытия или закрытия двери или капота, которые для блокировки света снабжаются подвижным флагом, падающим в щель, более сложным – в энкодерах (будет рассмотрено далее).

На рис. 10.1, *б* проиллюстрирована работа рефлекторного оптического датчика, который функционирует аналогично, но конструктивно отличается тем, что фототранзистор в рефлекторном датчике переключается светом, отраженным от детектируемой поверхности.

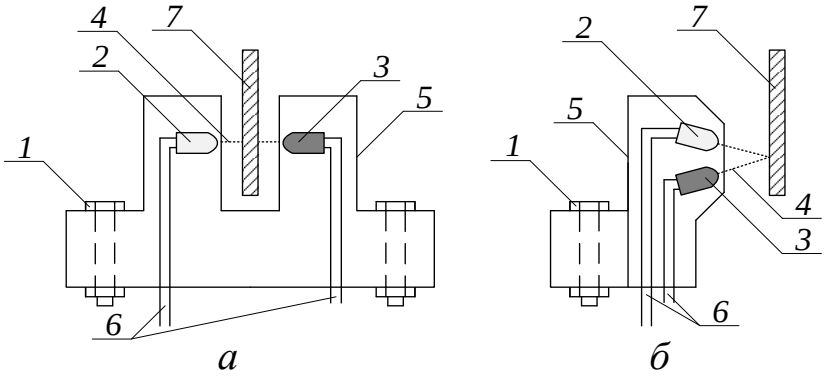


Рисунок 10.1 – Оптические датчики положения:
а – щелевой оптический переключатель-оптопрерыватель;
б – оптический датчик;
1 – крепеж; *2* –излучатель; *3* – фотоприемник; *4* – траектория светового потока; *5* – пластмассовый корпус; *6* – металлические контактные выводы полупроводниковых приборов; *7* – объект

Светодиод и фототранзистор рефлекторного датчика расположены с одной стороны поверхности детектируемого объекта. Рефлекторные датчики обеспечивают большую гибкость монтажа, но характеризуются фокусным расстоянием (оптимальным расстоянием от датчика до детектируемого объекта), на котором он должен быть помещен (обычно в пределах 2,54–12,7 мм) и относительно которого варьируется рабочий диапазон устройства.

При конструировании рефлекторного датчика важнейшим требованием к детектируемой поверхности является ее отражательная способность и качество отражения.

Луч, отраженный от стандартной поверхности, не сфокусирован и представляет собой усеченный конус с основанием на рефлекторной поверхности, образованным отражаемым коническим световым пучком светодиода, что не позволяет с высокой точностью обнаруживать малые отражающие объекты и ограничивает пространственное разрешение датчика. Для того чтобы уменьшить диаметр отражаемого луча, в качестве источников света применяются лазерные светодиоды, а для фокусировки луча на его пути от светодиода к фотодетектору в датчик встраиваются линзы.

Поскольку фототранзистор, при воздействии светового луча переходящий в состояние насыщения, обеспечивает готовый цифровой выход, в большинстве коммерчески доступных оптопрерывателей и рефлекторных датчиков используется именно данный тип фотоэлектрического преобразователя. Для включения датчика во

внешнюю цифровую схему потребуется только токоограничивающий резистор в цепи светодиода и внешний резистор между плюсом питания и выходом транзисторного ключа (рис. 10.2, *а*).

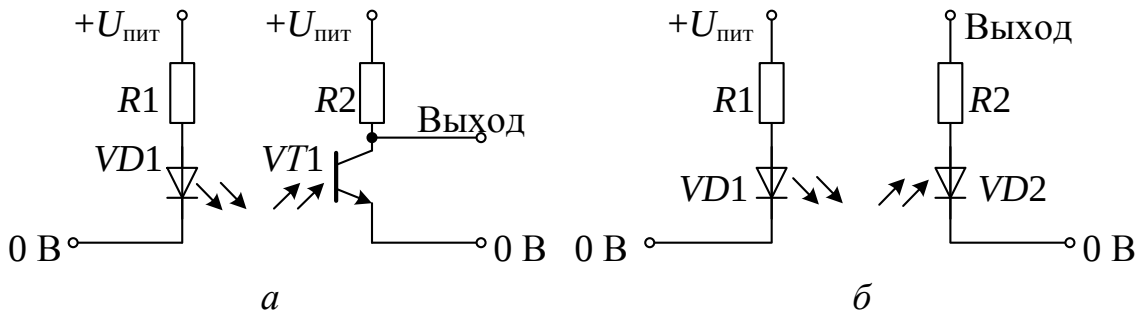


Рисунок 10.2 – Типичные принципиальные электрические схемы для включения оптопрерывателя и рефлектора:
а – схема на основе фототранзистора с цифровым выходом;
б – схема на основе фотодиода с аналоговым импульсным выходом;
VD1 – светодиод; VD2 – фотодиод; R1, R2 – токоограничивающие резисторы;
VT1 – фототранзистор.

Пара «светодиод-фототранзистор» характеризуется усилением менее 1. Сумма выходного тока коллектора фототранзистора, отнесенная к величине входного тока светодиода, называется коэффициентом передачи тока (КПТ, или CTR – Current transmission ratio). Типичный ток светодиода 10–20 мА с типичным CTR щелевого переключателя порядка 0,1 соответствует 1–2 мА выходного тока коллектора.

КПТ зависит от характеристик светодиода и фототранзистора и различен для оптических датчиков в широких пределах, поэтому значение резистора R2 должно гарантировать насыщение фототранзистора и стекание тока, достаточного для получения действительных амплитуд логических уровней при подключении оптического датчика к микроконтроллеру. Например, при токе светодиода 10 мА и КПТ = 0,1 значение резистора R2 должно быть выбрано приближенно равным 5 кОм. (Меньшее значение допустимо для оптического переключателя с высоким КПТ или с большим током светодиода и будет обеспечивать лучшую шумовую устойчивость (меньший импеданс) и более высокую скорость переключения).

Скорость переключения фототранзистора в любом оптическом датчике довольно малая, что ограничивает максимальную детектируемую скорость устройства и должно учитываться программой, считывающей выход датчика. Типичные значения времени включения (перехода в состояние насыщения) – 8 мс, времени выключения – 50 мс.

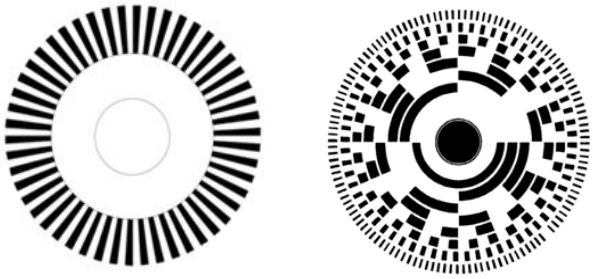
Рефлекторные датчики также характеризуются КПТ, который в отличие от оптопрерывателей не постоянен и зависит от силы отраженного света, типа поверхности и расстояния от поверхности до датчика. КПТ рефлекторного датчика специфицируется производителем со стандартной белой рефлекторной поверхностью, помещенной на фокусном расстоянии от датчика.

Поскольку КПТ рефлекторного оптического датчика варьируется в широком диапазоне, аналоговый выход (рис. 10.2, *б*) может быть более предпочтительным, поскольку пользователю предоставляется возможность самостоятельно подсоединять выход датчика к АЦП и программно отслеживать изменения в выходном уровне сигнала, что, полезно и для интерполяции сигналов инкрементальных энкодеров, но в этом случае необходимо больше времени для выборки АЦП.

10.3. Решетчатые датчики перемещения

Оптический датчик перемещения может быть изготовлен на основе двух перекрывающихся решеток, играющих роль модулятора интенсивности света. В отличии от ранее рассмотренных датчиков перемещения решетчатые предназначены для определения координат контролируемого объекта.

Принцип модуляции света при помощи решеток используется в так называемых энкодерах – *поворотных* или *линейных* кодирующих устройствах, в которых в подвижной маске (обычно изготовленной в виде диска) формируются прозрачные и непрозрачные участки (рис. 10.3).



а *б*

Рисунок 10.3 – Диски оптических шифраторов перемещений: *а* – относительных, *б* – абсолютных. При вращении диска по часовой стрелке (CW) сигнал *a* опережает сигнал *b* на 90° (*б*), а при вращении против часовой стрелки (CCW) – сигнал *a* отстает от *b* на 90° (Г)

Угловой оптический энкодер состоит из тонкого оптического диска и стационарного блока – измерительной головки, включающей источник

света и фотодетектор. Измерительная головка может быть построена как по принципу прерывателя, так и рефлектора, но прерыватель проще реализуется и используется чаще.

Оптический диск прерываемого энкодера включает кодированную последовательность прозрачных и непрозрачных участков. Маркеры могут представлять собой, например, отверстия в металлическом листе или метки на стеклянном диске. При вращении диска, в зависимости от его типа, маркеры пропускают или перекрывают луч света, направленный от светового источника к фотоприемнику (фотодиоду или фототранзистору).

Фотодетектор генерирует сигнал с частотой, равной частоте следования кодовых элементов, в цифровой форме (фототранзистор) или аналоговый импульсный сигнал, который также может быть усилен и оцифрован. При подключении внешнего счетчика прямоугольных импульсов оптический метод позволяет измерять угловую скорость вращения диска. Посредством нанесения специальной индексной отметки, индицирующей начальное положение диска, уже можно измерять относительное угловое положение вала в диапазоне 360°. Этот тип датчиков представляет собой так называемые инкрементальные энкодеры – самые простые и наименее дорогие оптические устройства.

Диск в данном случае выполняет роль прерывателя световых лучей оптопары. Когда непрозрачный участок диска перекрывает путь лучу, на выходе детектора устанавливается нулевой уровень сигнала. При прохождении луча через прозрачную зону выходной сигнал детектора равен единице. Оптические кодировщики часто используют ИК излучатели и детекторы, работающие в спектральном диапазоне 820…940 нм. Диски обычно изготавливаются из многослойной пластмассы, а непрозрачные участки на них формируются фотографическим методом. Такие диски имеют малый вес и инерционность, небольшую стоимость, а также обладают устойчивостью к ударам и вибрациям. Для расширения температурного диапазона диски изготавливают из металла, тогда рисунок в них выполняется по технологии травления.

Существует два типа кодирующих дисков: дискретных и абсолютных перемещений. В первом случае импульсы вырабатываются при повороте диска на фиксированную величину угла (шаг), во втором случае угловое перемещение задается комбинацией прозрачных и непрозрачных секторов, расположенных по радиусу диска. Обычно рисунок диска абсолютных перемещений соответствует конкретному

цифровому коду. Чаще других используется код Грея, двоичный и двоично-десятичный код.

Поскольку диски первого типа имеют более простую конструкцию, а, значит, и меньшую стоимость, они и получили более широкое распространение в кодирующих системах. В шифраторах дискретных перемещений достаточно использовать только один оптический канал (пару излучатель-детектор). Если необходимо определять и скорость угловых перемещений, и их направление, требуются два оптических канала. Для этого чаще других применяется квадратурный метод детектирования, когда определяется фазовый сдвиг между выходными сигналами двух оптических каналов, по знаку которого можно судить о направлении движения, а по величине – о скорости и перемещении.

10.4. Поляризационный детектор приближения

Использование поляризационного света позволяет улучшить характеристики оптоэлектронных датчиков. Каждый фотон света обладает индивидуальными направлениями магнитного и электрического полей, перпендикулярных друг другу и направлению распространения излучения. Направление электрического поля совпадает с направлением поляризации света. Большинство источников света испускают фотоны, имеющие произвольную поляризацию. Для того чтобы свет стал поляризованным, его надо направить на поляризационный фильтр, изготовленный из специального материала, пропускающего фотоны только одного направления поляризации, остальные фотоны при этом либо поглощаются, либо отражаются. Однако любое направление поляризации можно представить в виде геометрической суммы двух ортогональных составляющих. Одна из этих составляющих совпадает с направлением поляризации фильтра. Тогда, поворачивая источник света, можно *постепенно* изменять интенсивность света на выходе фильтра.

После встречи поляризованного света с объектом отраженные лучи могут либо сохранить то же самое направление поляризации (зеркальное отражение), либо изменить угол поляризации. Последний вариант характерен для многих неметаллических объектов. Таким образом, для того чтобы реализовать датчик, который бы не реагировал на отражающие объекты (например, металлические консервные банки, обертки из фольги и т.д.), в нем должно быть два перпендикулярно

направленных поляризационных фильтра. Один рядом с источником света, а другой рядом с детектором (рис 10.4, *а* и 10.4, *б*).

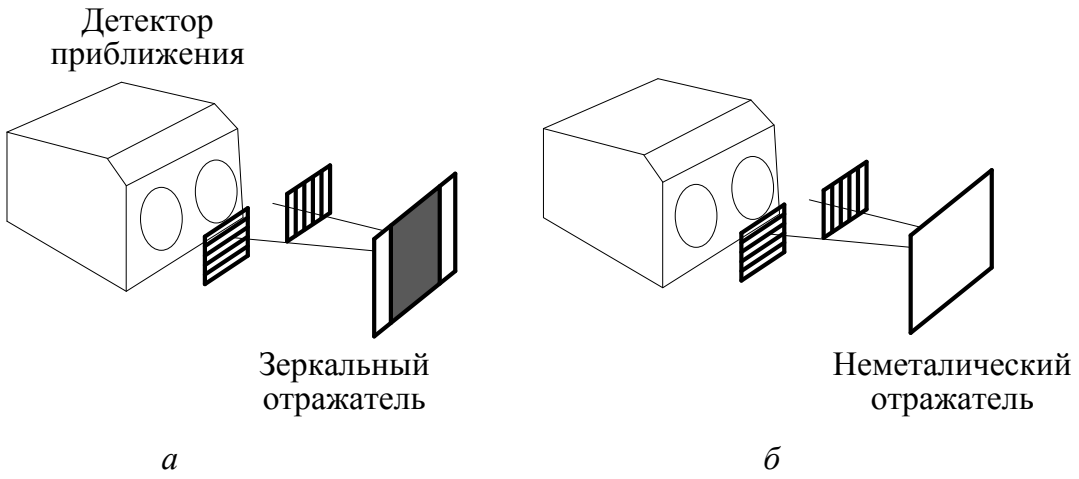


Рисунок 10.4 – Детектор приближения с двумя поляризационными фильтрами, расположенными под углом 90° друг к другу:
а – поляризованный свет отражается от металлического объекта, не меняя направление поляризации; *б* – неметаллический объект меняет направление поляризации отраженного света, что позволяет ему пройти через поляризационный фильтр

Первый фильтр располагается рядом с излучающей линзой и служит для поляризации лучей от источника света, а второй – рядом с принимающей линзой детектора, его назначение – пропускать только компоненты излучений, направленные под углом 90 ° к испускаемому свету. Если свет отражается от зеркальных рефлекторов, направление его поляризации не меняется и, следовательно, принимающий фильтр ничего не пропустит на фотодетектор. Однако, если происходит не зеркальное отражение от объекта, часть фотонов, имеющих соответствующее направление поляризации, достигнет фотодетектор. Следовательно, использование выходных поляризационных фильтров позволяет снизить а ложные срабатывания при детектировании неметаллических объектов.

10.5. Волоконооптические датчики приближения

Волоконооптические датчики могут достаточно эффективно использоваться в качестве детекторов приближения и уровня. На рис. 10.5 показан оптический детектор уровня жидкости. Он состоит из двух оптоволоконных световодов и призмы. Принцип его действия основан на

разности коэффициентов преломления воздуха (или газообразной фазы материала) и жидкости, уровень которой необходимо определить.

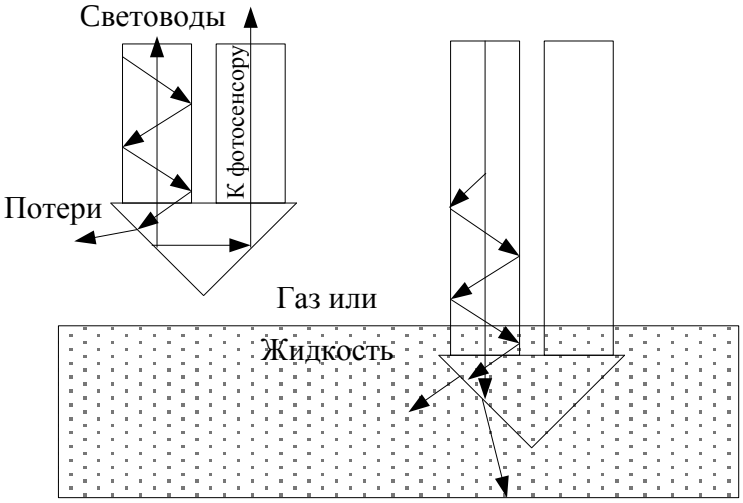


Рисунок 10.5 – Оптический детектор уровня жидкости, построенный на принципе изменения коэффициентов преломления в жидкой и воздушной среде

Когда датчик находится выше уровня жидкости, большая часть света передающего световода (левого) попадает в принимающий световод (правый), по возможно благодаря полному внутреннему отражению призмы. Однако часть лучей достигают отражающую поверхность призмы под углами меньшими, чем угол полного внутреннего отражения, и теряются в окружающей среде. Когда призма достигает уровня жидкости, ее угол полного внутреннего отражения изменяется, поскольку коэффициент преломления жидкости превышает коэффициент преломления воздуха. Это приводит к большему падению интенсивности света, измеряемой на конце принимающего световода. Интенсивность света преобразуется в электрический сигнал при помощи соответствующего фотодетектора.

10.6. Датчики Фабри-Перо

Для прецизионного измерения малых перемещении в неблагоприятных условиях окружающей среды применяются, так называемые, оптические резонаторы Фабри-Перо, состоящие из двух полуотражающих зеркал, расположенных напротив друг друга на расстоянии L (рис. 10.6, *а*). Свет в резонатор поступает от источника с известными характеристиками, например, от лазера. Фотоны, попадая в резонатор, начинают отражаться то от одного, то от другого зеркала. В

процессе этих отражений они интерферируют друг с другом. Фактически, резонатор играет роль светового накопителя. За пределы резонатора могут выйти фотоны только определенных частот. Таким образом, можно считать, что интерферометр Фабри-Перо является частотным фильтром, частота пропускания которого определяется длиной резонатора (рис. 10.6, *б*). При изменении длины резонатора соответственно меняются и частота выходящего света. Если сделать одно из зеркал подвижным, то, измеряя выходящую частоту импульсов света, можно определять очень маленькие изменения длины резонатора. Частота выходных импульсов кратна интервалу $\Delta\nu$, обратно пропорциональному длине резонатора:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}, \tag{10.1}$$

где c – скорость света. Для используемых на практике резонаторов расстояние между зеркалами составляет порядка 1 мкм, а типичные значения $\Delta\nu$ лежат в интервале 500 МГц…1 ГГц. Таким образом, по разнице частот выходного излучения и сигнала от эталонного источника света можно судить об изменении длины резонатора с точностью, сравнимой с длиной волны света. Объектом измерения может быть любая физическая величина, изменение которой приводит к изменению размеров резонатора (перемещению зеркал): например, механическое напряжение, сила, давление и температура.

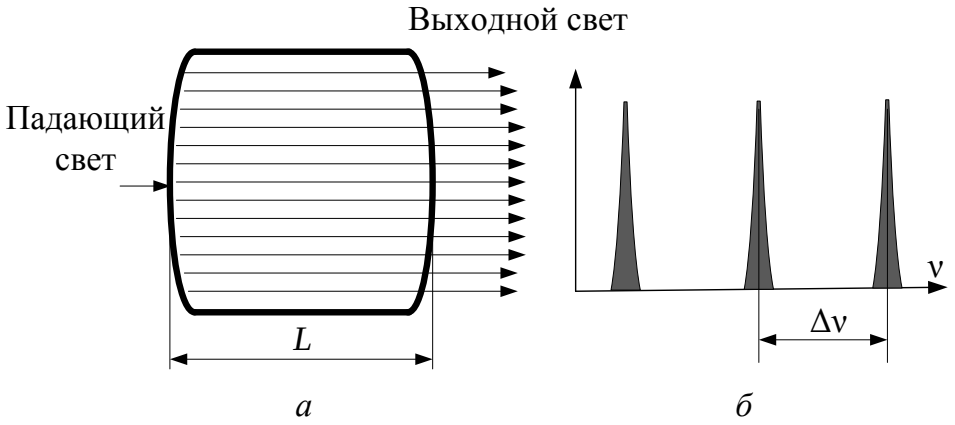


Рисунок 10.6 – Датчик Фабри-Перо:
а – многократная интерференция света внутри резонатора Фабри-Перо;
б – импульсы света на выходе резонатора

Благодаря своей универсальности, детекторы Фабри-Перо получили широкое распространение. Например, они используются для измерения давления, и температуры. Такие датчики детектируют изменения длины оптического пути, вызванные либо изменениями коэффициента преломления, либо изменением физической длины резонатора. Детекторы

Фабри-Перо, изготовленные при помощи MEMS технологий, обладают миниатюрными размерами и низкой стоимостью. Другим достоинством микродатчиков Фабри-Перо является то, что для генерации интерференционного сигнала им подходят практически любые когерентные источники света, даже такие как СИД.

На рис. 10.6 показан датчик давления, использующий резонатор Фабри-Перо. Давление, действующее па верхнюю мембрану, заставляет диафрагму прогибаться вниз, тем самым уменьшая высоту резонатора *L*. Резонатор изготавливается в виде монолитного кристалла методами микротехнологий, поэтому зеркала представляют собой либо диэлектрические, либо металлические слои, нанесенные на соответствующую подложку. Для получения требуемых характеристик датчика, толщину каждого слоя необходимо строго контролировать.

На рис. 10.7 показан микродатчик давления, выпускаемый FISO Technologies (www.fiso.com). Который обладает очень низким коэффициентом температурной чувствительности (менее 0.03 %) и имеет внешний диаметр 0,55 мм, что делает его идеальным для применения в составе имплантируемых медицинских устройств и других миниатюрных инструментов.

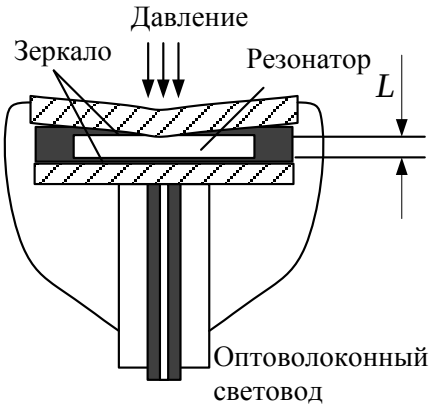


Рисунок 10.7 – Конструкция датчика давления Фабри-Перо

Преимущества данного метода: линейность; нечувствительность к интенсивности излучения источника света и излучения, возникающего при передаче сигналов по световодам; универсальность, т.е. возможность измерения различных внешних воздействий одним и тем же инструментом; широкий динамический диапазон (1:15000) и высокая разрешающая способность. В дополнение к этому волоконооптические датчики устойчивы ко многим видам электромагнитных и радиочастотных помех и могут работать в суровых условиях окружающей среды, например, в СВЧ-печах.

10.7. Оптические гироскопы

Многие современные датчики, используемые в системах контроля и управления, реализуются на основе *эффекта Саньяка* (рис. 10.8).

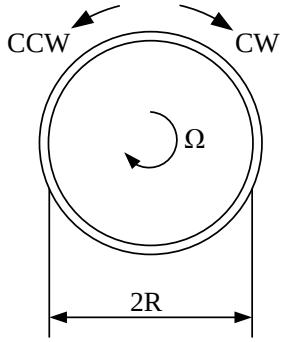


Рисунок 10.8 – Эффект Саньяка

Два лазерных луча света распространяются в противоположных направлениях внутри оптического кольца радиуса R, обладающего коэффициентом преломления n. Соответственно один луч перемещается по часовой стрелке (CW), а второй – против часовой стрелки (CCW). Лучу света, чтобы сделать один оборот вокруг кольца, требуется время $\Delta t=2\pi R/nc$, где c – скорость света. Теперь предположим, что кольцо вращаешься с угловой скоростью Ω по часовой стрелке. В этом случае двум лучам, перемещающимся в противоположных направлениях, придется пройти разный путь. Для движущегося по часовой стрелке луча путь составит $l_{cw}=2\pi R+\Omega R\Delta t$, а для второго луча – $l_{ccw}=2\pi R-\Omega R\Delta t$, Следовательно, разница между путями составит:

$$\Delta l = \frac{4 \cdot \pi \cdot \Omega \cdot R^2}{n \cdot c}. \qquad (10.2)$$

Очевидно, что для точного измерения Ω, необходимо корректно определять Δl. Для этого разработаны три типа устройств:

- оптические резонаторы,
- интерферометры без ОС,
- интерферометры с ОС.

В кольцевом лазерном гироскопе для определения Δl используются свойства когерентности лазерного излучения. Для возбуждения лазерного излучения в замкнутой оптической полости вдоль длины кольца должно укладываться целое количество длин волн. Световые лучи, не удовлетворяющие этому условию, последовательно проходя оптический путь, интерферируют сами с собой. Для компенсации изменения длины пути, вызванные вращением кольца, длина волны λ и частота излучения υ

должны также меняться:

$$-\frac{d\upsilon}{\upsilon}=\frac{d\lambda}{\lambda}=\frac{dl}{l}. \qquad (10.3)$$

Данное выражение является фундаментальным уравнением, связывающим частоту, длину волны и путь излучения в кольцевом лазере. При вращении кольцевого лазера с угловой скоростью ω из уравнения $\Delta l=\frac{4\cdot\pi\cdot\omega\cdot R^2}{n\cdot c}$ вытекает, что световые волны должны растягиваться в одном направлении и сжиматься в другом; это необходимо для получения целого числа длин волн вдоль длины кольца для выполнения критерия возбуждения когерентных волн. Отсюда можно найти разность частот между световыми лучами. При смешивании двух лучей частота результирующего сигнала определяется выражением:

$$F=\frac{4\cdot A\cdot\omega}{\lambda\cdot n\cdot l}, \qquad (10.4)$$

где A – площадь внутри кольца.

На практике оптические гироскопы строятся либо на основе оптоволоконного кольцевого резонатора, либо на основе оптоволоконной катушки, состоящей из многих витков оптоволокна.

На рис. 10.9, *а* показан оптический кольцевой резонатор.

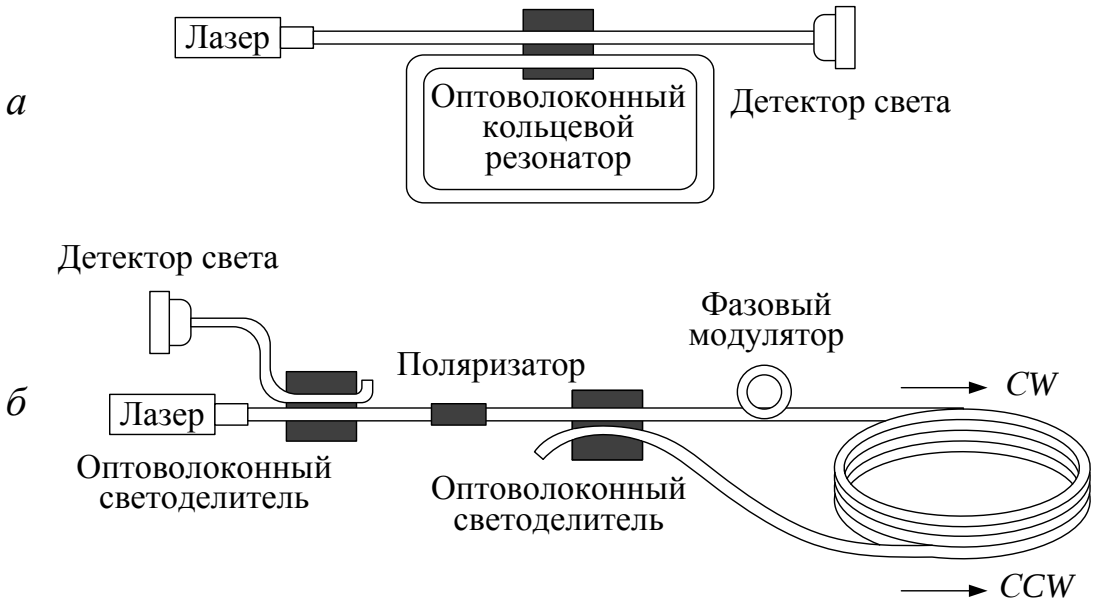


Рисунок 10.9 – Устройства на эффекте Саньяка:
а – оптоволоконный кольцевой резонатор;
б – аналоговый гироскоп на основе оптоволоконной катушки

Он состоит из оптоволоконной петли, образованной на основе оптоволоконного светоделителя, имеющего очень низкий коэффициент перекрестных связей. Когда частота входящего луча совпадает с резонансной частотой оптоволоконного кольца, большая часть света остается в нем, а интенсивность излучения, дошедшего до детектора, резко падает. Гироскоп, реализованный на основе оптоволоконной катушки (рис. 10.9, *б*), состоит из источника света и детектора, связанных оптоволоконными световодами.

Между детектором и вторым разветвителем размещается поляризатор. Он служит для обеспечения того, чтобы оба встречно направленных луча проходили одинаковый маршрут вдоль катушки. Оба луча смешиваются и направляются на детектор, который регистрирует косинусоидальные изменения интенсивности излучения, вызванные меняющимся сдвигом фаз между лучами, возникающим из-за вращения катушки. Такие оптические гироскопы сравнительно недороги, имеют небольшие размеры и позволяют реализовывать датчики вращения с динамическим диапазоном до 10000. Оптические гироскопы используются для измерения отклонений от заданного направления движения, угла наклона, в системах стабилизации углового положения и также в системах навигации. Основным достоинством таких датчиков является их способность работать в суровых условиях окружающей среды, где не могут работать механические гироскопы.

10.8. Флуоресцентные датчики температуры

Эти датчики реализуются на основе свойства некоторых фосфорных компонентов излучать свет в ответ на возбуждение лучами видимого диапазона спектра. Такие компоненты наносятся на поверхность объекта, температуру которого необходимо измерить. После чего объект подвергается воздействию УФ импульсного излучения. Возникшее в результате этого облучения послесвечение детектируется и анализируется. Форма импульса послесвечения зависит от температуры. Время спада импульса послесвечения в широком температурном диапазоне является параметром, обладающим очень высокой воспроизводимостью. В качестве чувствительного материала в флуоресцентных датчиках применяется фтормагнетит магния, активированный четырехвалентным марганцем. Фосфор длительное время применялся только как корректор цвета ртутных ламп, используемых для освещения улиц. Порошок фосфора получается в ходе реакции в твердой фазе при температуре 1200 °С. Он является относительно инертным и термоустойчи-

вым веществом, безопасным с биологической точки зрения. Он не разрушается от воздействия большинства химических реагентов и длительного УФ излучения. Он переходит в возбужденное состояние при облучении его светом УФ или синей области спектр. Флуоресцентное свечение фосфора находится в дальнем красном спектральном диапазоне, а его интенсивность спадает по экспоненциальному закону.

Для снижения возможности возникновения перекрестных помех между сигналами возбуждающего и флуоресцентного излучений, на их пути устанавливаются полосовые фильтры, пропускающие волны только заданных зон спектра (рис. 10.10, *а*). В качестве источника возбуждения применяется ксеноновая импульсная лампа, которая может одновременно использоваться несколькими оптическими каналами в составе комплексных систем измерения. Процесс измерения температуры заключается в определении скорости ослабления флуоресцентного свечения (рис. 10.10, *б*). Это значит, что значение температуры находится по постоянной времени τ, величина которой в температурном диапазоне –200...+400 °С уменьшается в пять раз. Измерение времени выполняется при помощи электронной схемы, как правило, с очень высокой точностью. Поэтому датчики флуоресцентного типа позволяют измерять температуру с хорошей разрешающей способностью порядка +2 °С в широком температурном диапазоне без проведения калибровки.

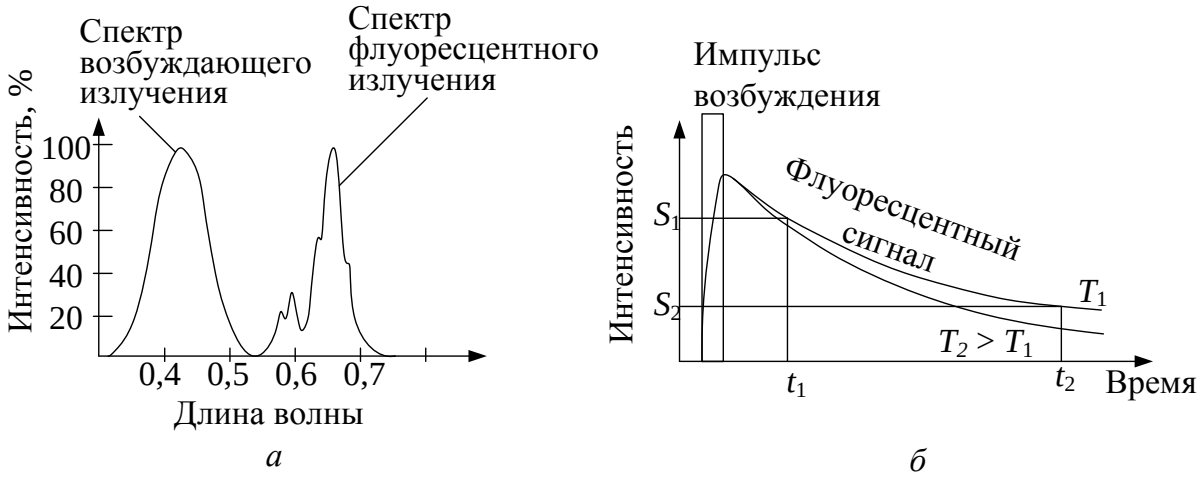


Рисунок 10.10 – Флуоресцентный метод измерения температуры:
а – спектральные характеристики возбуждающего и флуоресцентного излучений; *б* – спад послесвечения по экспоненциальному закону для двух температур T_1 и T_2; *е* – основание натурального логарифма; *t* – постоянная времени характеристики спада

Поскольку постоянная времени не зависит от интенсивности возбуждающего излучения, возможна реализация датчиков самых разнообразных конструкций. Например, фосфорный состав может наносится непосредственно на поверхность объекта, при этом оптическая система проводит измерения бесконтактным способом (рис. 10.11, *а*). Это дает возможность проведения непрерывного мониторинга температуры объекта без внесения возмущений в зону измерений. В другой конструкции фосфор наносится на конец упругого зонда, способного вступать в плотный контакт с объектом (рис. 10.11, *б* и 10.11, *в*).

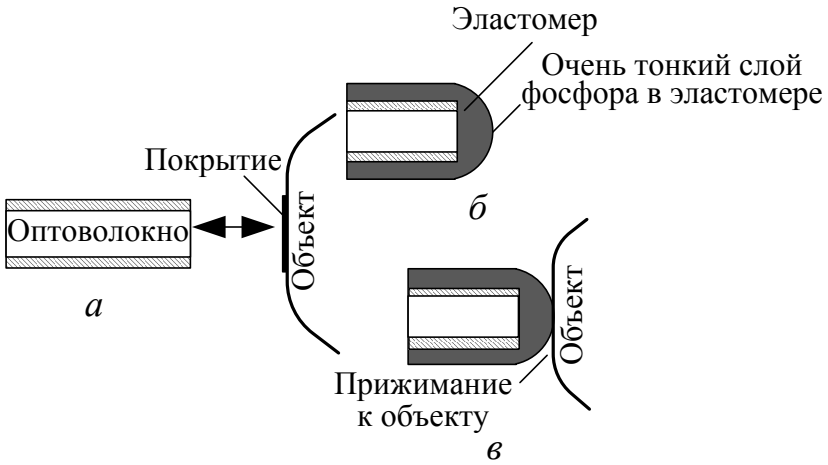


Рисунок 10.11 – Расположение фосфорных компонентов:
а – на поверхности объекта; *б* и *в* – на конце зонда

Лекция 11. ХИМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

11.1. *Общие сведения.*
11.2. *Металл-оксидные химические датчики.*
11.3. *Химические полевые транзисторы.*
11.4. *Электрохимические датчики.*
11.5. *Потенциометрические датчики.*
11.6. *Кондуктометрические датчики.*
11.7. *Эластомерные химические резисторы.*

11.1. Общие сведения

Химические датчики реагируют либо на определенные *химические вещества*, либо на *химические реакции*. Их назначение – идентификация и количественное определение химических реагентов в газовой и жидкой фазах (химические датчики для твердых веществ практически не используются).

В промышленности химические датчики используются для контроля за технологическими процессами при производстве пластмасс, а также при литье металлов, где количество диффундированных газов влияет на некоторые параметры металлов, например, на их прочностные характеристики. Они применяются для мониторинга среды в рабочих помещениях, для определения концентраций опасных для здоровья людей компонентов. Сфера применения химических датчиков постоянно растет: тестирование и контроль над качеством продуктов питания, за распространением пестицидов в сельском хозяйстве и т.д.

В медицине химические датчики применяются для тестирования состояния здоровья людей по анализам состава крови и газов, находящихся в легких. Такие датчики также используются при определении уровня алкоголя в крови и для диагностирования проблем пищеварения.

Для описания большинства химических датчиков используются общие для всех детекторов характеристики: стабильность, воспроизводимость, линейность, гистерезис, насыщение, время реакции и диапазон измерений. Но также существуют два параметра, характерные только для этой группы датчиков: избирательность и чувствительность к определенному химическому реагенту, входящему в состав сложных композиций.

Избирательность – это способность детектора реагировать только на определенное химическое вещество и не реагировать на все остальные. *Чувствительность* характеризуется либо минимальной концентрацией детектируемого вещества, либо минимальным изменением его концентрации (этот параметр часто называют разрешающей способностью), достаточных

для надежного детектирования датчиком. Следует отметить, что если в предыдущих разделах синонимом термина «чувствительность» был наклон линейной передаточной функции, то для химических датчиков аналогом чувствительности является разрешающая способность.

Основная проблема химических датчиков заключается в том, что исследуемые химические реакции меняют сам датчик, к сожалению, часто необратимо. Например, электрохимические элементы на основе жидких электролитов (материалов, проводящих электрический ток не за счет электронов, а при помощи ионов) при каждом измерении теряют небольшое количество электролита, поэтому надо либо постоянно пополнять его, либо использовать датчики другого типа, такие как химические детекторы на основе полевых транзисторов.

Другой проблемой является то, что химические датчики могут подвергаться воздействию неограниченного количества различных комбинаций химических реагентов, все из которых просто невозможно смоделировать. При этом за счет загрязнений различных типов, либо забивающих поры пленочных детекторов, либо изменяющих чувствительную поверхность (например, кремний в циркониевых датчиках создает не удаляемую пленку) могут происходить серьезные изменения рабочих параметров датчиков, определенных в процессе калибровки.

Существует две классификации химических датчиков: по типу явления, лежащего в основе их принципа действия, и по методу измерения. Все химические детекторы можно разделить на две большие группы: *прямого измерения* (простые) и *косвенные* (составные). Каждая группа, в свою очередь, делится на устройства *химического* и *физического* типа.

Датчики прямого действия основаны на свойствах некоторых химических реакций, менять параметры электрической цепи: сопротивления, напряжения, тока или емкости (рис. 11.1). Такие датчики используют дополнительные схемы для согласования выходных электрических сигналов с интерфейсной схемой, но в них нет никаких преобразователей, конвертирующих одну форму энергии в другую.

По типу воздействия на электрические характеристики чувствительного элемента датчики прямого действия делятся на: кондуктометрические (переменный параметр – сопротивление или импеданс чувствительного элемента), амперометрические (переменный параметр – ток, протекающий через чувствительный элемент) и потенциометрические (переменный параметр – напряжение на паре

электродов). При помощи соответствующих электронных схем переменные параметры легко преобразуются из одной формы в другую. Существует множество химических и физических реакций, на базе которых можно реализовать датчики прямого действия.

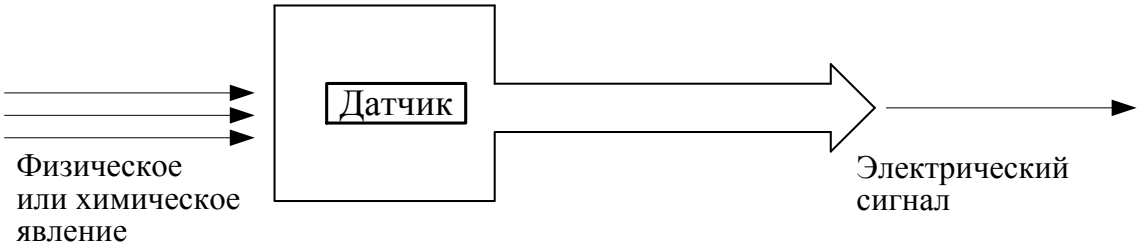


Рисунок 11.1 – Датчики прямого действия

Датчики же косвенного типа (рис. 11.2) основаны на химических реакциях, не вызывающих непосредственного изменения электрических параметров, поэтому в их состав всегда входят дополнительные преобразователи, конвертирующие побочные явления реакций (изменение физических размеров, сдвиг частоты, модуляцию света, изменение температуры и даже массы) в электрические сигналы.

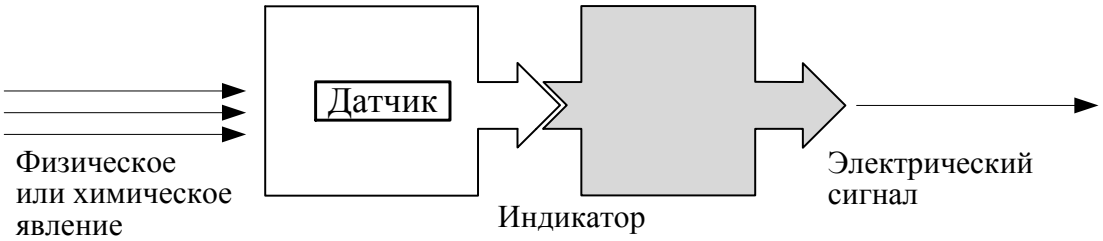


Рисунок 11.2 – Датчики косвенного действия

11.2. Металл-оксидные химические датчики

Металл-оксидные газовые датчики на основе диоксида олова (SnO_2) появились в конце 1960-х годов. Они являются простыми и прочными устройствами, довольно легко согласуемыми с любыми электрическими схемами. Такие детекторы основаны на свойстве некоторых оксидов металлов в присутствии определенных газов или паров (таких, как CH_3SH и C_2H_5OH) менять свои электрические характеристики. При нагреве в воздухе кристаллов оксида металла, например, SnO_2, до заданной достаточно высокой температуры поверхность кристалла начинает адсорбировать атомы кислорода, в результате чего она становится

заряженной, что уменьшает ток электронов. При воздействии на поверхность детектора определенных газов происходит снижение ее потенциала, что значительно повышает проводимость кристалла.

Для нахождения соотношения между электрическим сопротивлением пленки и измеряемой концентрацией газов можно воспользоваться следующим эмпирическим выражением:

$$R_S = A[C]^{-\alpha}, \qquad (11.1)$$

где R_s – электрическое сопротивление детектора, A – константа, определенная для данного химического состава, C – концентрация исследуемых газов, а α – угол наклона характеристической кривой сопротивления, построенной для данного оксида металла и конкретного газа.

Поскольку в таких детекторах меняется удельное сопротивление кристалла, они не могут работать самостоятельно, а должны быть включены в состав дополнительной электронной схемы. В роли такой схемы, как правило, используется мост Уинстона, в одно из плечей которого встраивается детектор. Изменение сопротивления детектора приводит к разбалансу моста (рис. 11.3). Для температурной балансировки мостовой схемы применяется термистор с отрицательным температурным коэффициентом с параллельным линеаризующим резистором.

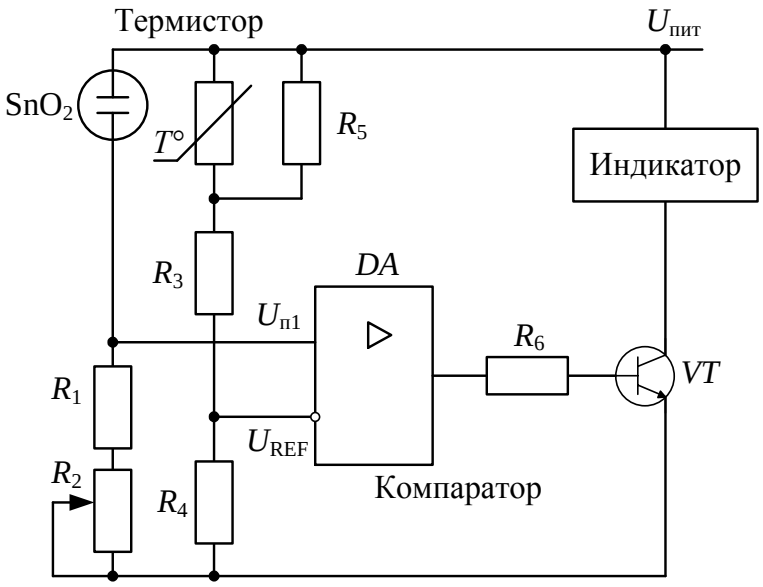


Рисунок 11.3 – Металл-оксидный химический детектор, включенный в схему моста Уинстона

11.3. Химические полевые транзисторы

Такие датчики реализуются на основе полевых транзисторов, на затворы которых наносятся один или несколько слоев специальных

покрытий, способных реагировать на определенные химические вещества (рис. 11.4). Эти химические реагенты, воздействуя на затвор, меняют проводимость транзистора между стоком и истоком. Величина этих изменений определяется типом химического вещества. В зависимости от типа исследуемых реагентов меняется и тип покрытий. Существующие химические полевые транзисторы позволяют детектировать водород в воздухе, кислород в крови, некоторые нервно-паралитические газы, NH_3, CO_2 и некоторые взрывоопасные вещества.

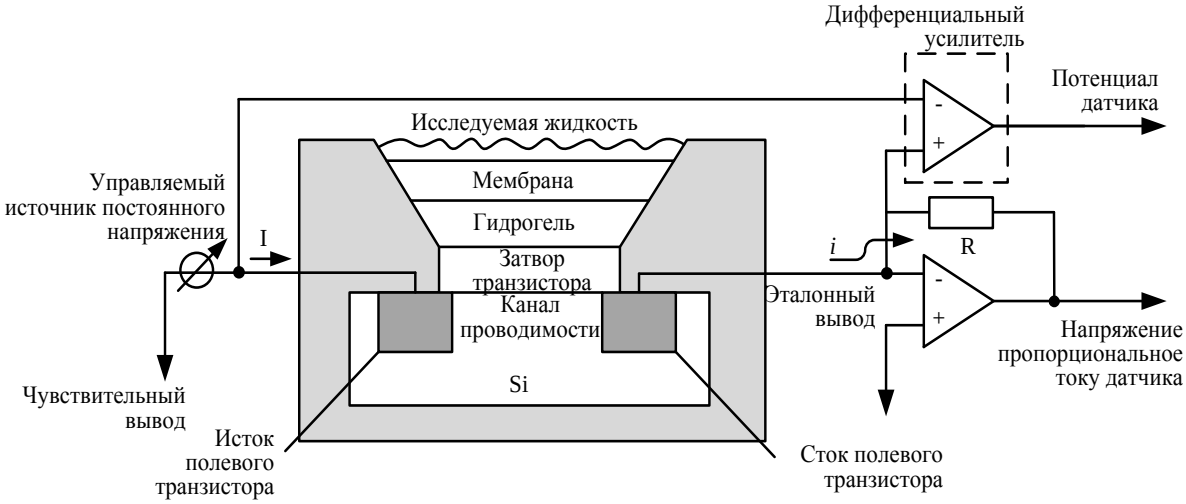


Рисунок 11.4 – Конструкция жидкостного химического полевого транзистора и электрическая схема его включения

Для изготовления *химических полевых транзисторов* (ХПТ), также как и обычных ПТ, применяются тонкопленочные технологии. ХПТ, как правило, реализуются на подложке из кремния *p*- типа, на которой методом диффузии сформированы две области *n*- типа (сток и исток). Полученная конструкция покрывается изоляционным слоем диоксида кремния, и над зоной между стоком и истоком формируется металлический электрод (затвор ПТ), на который наносится многослойное химическое покрытие. Во время работы на транзистор подается напряжение. Электроны, собирающиеся возле поверхности полупроводника за счет поляризации специальных покрытий, нанесенных на затвор, формируют канал проводимости между *n*- зонами стока и истока. Фактически, ХПТ работает как химически управляемый резистор. ХПТ подключен ко входам дифференциального усилителя, выходное напряжение которого пропорционально проводимости транзистора. Также проводимость ХПТ можно определить при помощи преобразователя ток-напряжение с эталонным резистором *R*.

11.4. Электрохимические датчики

Электрохимические детекторы являются самыми универсальными среди всех химических датчиков. В зависимости от принципа действия они делятся на детекторы, измеряющие напряжение (потенциометрические) и измеряющие проводимость или сопротивление (кондуктометрические). В конструкции любого электрохимического датчика присутствуют, как минимум, два специальных электрода, между которыми протекает химическая реакция или происходит перемещение зарядов, образующихся в процессе этой реакции. При проведении измерений электрическая цепь детектора должна быть замкнута.

Электроды изготавливаются из каталитических металлов, таких как платина или палладий, или из металлов с угольным покрытием. Площадь электродов делается по возможности максимально большой, чтобы, как можно большее количество анализируемого раствора вступило в реакцию, поскольку от этого зависит величина выходного сигнала. Для повышения срока службы и увеличения реакционной способности поверхность электродов иногда обрабатывается особым образом. На рис. 11.5 показана схема электрохимического датчика. Электрод WE, участвующий в химической реакции, называется *рабочим* электродом. Электрический сигнал измеряется относительно *вспомогательного* электрода AE, который не обязательно должен быть электролитическим.

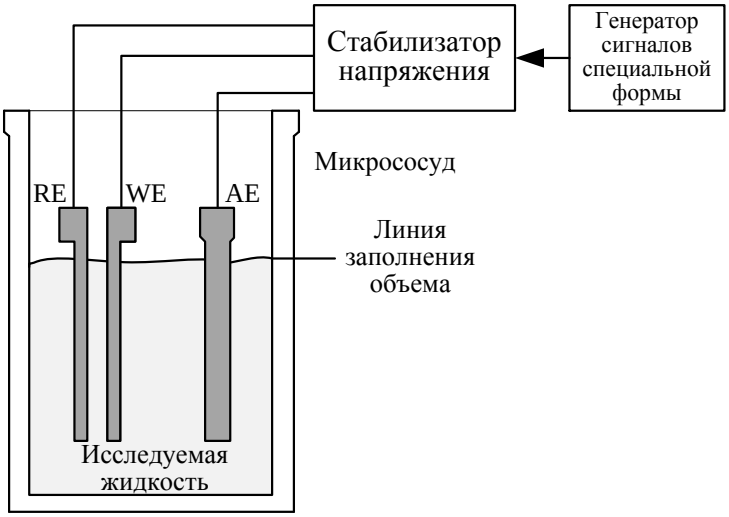


Рисунок 11.5 – Схема электрохимического датчика

Третий электрод - *эталонный* (RE) используется для корректировки погрешности, вносимой поляризацией рабочего электрода. В современных

электрохимических датчиках толстопленочные электроды изготавливаются методом трафаретной печати, что повышает их надежность и упрощает процесс производства.

Электролит – это среда, в которой носителями зарядов являются не электроны, а ионы. Это условие является первым критерием отбора анализируемых химических реакций. Детектор, состоящий из электродов и электролита, называется электрохимической ячейкой. В зависимости от того, за какими электрическими параметрами ведется наблюдение (за сопротивлением, напряжением, током, емкостью и т.д.), меняется и вид электрохимической ячейки. Самая простая электрохимическая ячейка состоит из двух электродов, помещенных в раствор электролита. Анализируемый газ, например, CO вступает в реакцию с рабочим электродом, в результате которой вырабатываются молекулы CO_2 и свободные электроны. Заряженные частицы притягиваются вторым электродом, и если в среде есть кислород, происходит образование воды. Таким образом, в электрохимической ячейке происходит преобразование CO в CO_2. Если электроды соединить последовательно с резистором, и измерять падение напряжения на нем, оно будет пропорционально протекающему току, а, значит, и концентрации исследуемого газа.

11.5. Потенциометрические датчики

Эти датчики основаны на влиянии концентрации реагентов на равновесие окислительно-восстановительных реакций, происходящих в электрохимической ячейке на границе электрод-электролит. Электрический потенциал на этой границе возникает благодаря химической реакции, которую можно описать в виде:

$$\mathrm{Ox} + \mathrm{Ze} = \mathrm{Red}, \tag{11.2}$$

где Ox – окислитель; Red – восстановитель; Ze – число электронов, учавствующих в реакции.

Эта реакция протекает на одном из электродов (в данном случае на катоде) и называется реакцией половины ячейки. В условиях термодинамического квазиравновесия можно применить уравнение Нернста:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_0^*}{C_R^*}, \tag{11.3}$$

где C_0^* и C_R^* – концентрации восстановителя и окислителя, n – количество электронов, F – константа Фарадея, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, E_0 – начальный потенциал электрода. В потенциометрических датчиках одновременно протекают реакции на двух электродах. Однако анализируемые реагенты участвуют только в одной из них.

Измерение потенциала ячейки потенциометрического датчика выполняется при практически нулевом токе, т.е в квазиравновесном состоянии, для чего требуется применение измерительного устройства, обладающего очень высоким входным импедансом, называемого электрометром. С точки зрения переноса заряда переходная область электрод-электролит может быть либо неполяризованной либо поляризованной (емкостной). Некоторые металлы (например, Hg, Au, Pt) при контакте с растворами из инертных электролитов формируют переходную зону с идеальной поляризацией. Тем не менее, даже здесь существует конечное сопротивление переносу заряда, и процесс рассасывания избыточного заряда происходит с постоянной времени, определяемой произведением емкости двуслойной системы и сопротивления переносу заряда: $\tau = R_{ct}C_{df}$.

Ион-селективные мембраны являются ключевыми компонентами всех потенциометрических ионных датчиков. Они определяют эффективность детектирования ионов определенных веществ в присутствии ионов других компонентов. Ион-селективные мембраны формируют с раствором неполяризованную переходную зону. Хорошие мембраны, обладающие селективностью, стабильностью, воспроизводимостью, устойчивостью к адсорбции и смешиванию, имеют также высокую плотность обменного тока.

11.6. Кондуктометрические датчики

Электрохимические датчики проводимости измеряют изменение проводимости электролита в электрохимической ячейке. Импеданс электрохимических датчиков может быть емкостным, что связано с поляризацией электродов и переносом зарядов.

В гомогенных электролитических растворах проводимость электролита G (Ом$^{-1}$) обратно пропорциональна расстоянию L между электродами вдоль электрического поля и прямо пропорциональна

продольному сечению электрохимической ячейки A, перпендикулярному электрическому полю:

$$G = \frac{\rho A}{L}, \tag{11.4}$$

где ρ (Ом$^{-1}$·см$^{-1}$) – удельная проводимость электролита, определяемая концентрацией и величиной зарядов ионов. Зависимость эквивалентной проводимости раствора Λ от концентрации C, выраженной в моль/л или любых других единицах, имеет следующий вид:

$$\Lambda = \Lambda_0 - \beta C^{0,5}, \tag{11.5}$$

где β – характеристика электролита, а Λ_0 – эквивалентная проводимость электролита при бесконечном разбавлении.

Способы измерения проводимости электролитов при помощи кондуктометрических датчиков остаются практически неизменными в течение многих лет. Обычно электрохимическая ячейка включается в одно из резистивных плечей моста Уинстона (аналогично схеме на рис. 11.3). Однако в отличие от измерения проводимости твердых веществ, при определении проводимости электролитов возникают проблемы, связанные с поляризацией электродов. В дополнение к этому на поверхностях электродов происходят процессы переноса зарядов. Поэтому желательно, чтобы кондуктометрические датчики работали при напряжениях, при которых эти процессы не происходят.

Следует отметить, что при подаче напряжения на ячейку, рядом с каждым электродом формируется двойной слой, что необходимо учитывать при измерении проводимости. Влияние всех этих эффектов снижается при использовании электрохимических ячеек с высоким значением отношения L/A, т.е. сопротивление ячеек должно лежать в интервале 1...50 кОм.

Для выполнения этого условия электроды должны обладать небольшой площадью поверхности, а расстояние между ними следует делать, наоборот, большим. Однако это приводит к снижению чувствительности моста Уинстона. Для разрешения этого противоречия применяют многоэлектродную структуру ячейки. Влияние двойного слоя и поляризации также значительно снижается при использовании переменного тока высокой частоты и небольшой амплитуды. Существует еще один хороший способ балансировки емкости и сопротивления рабочей ячейки – подключение конденсатора переменной емкости параллельно резистору, стоящему в соседнем плече моста.

11.7. Эластомерные химические резисторы

Эластомерные химические резисторы или полимерные проводящие композиты (ППК) являются полимерными пленками, увеличивающимися в своих размерах при поглощении определенных химических веществ. Это приводит к повышению их сопротивления, что и является признаком присутствия искомых газов. Хотя в таких датчиках и не протекают никакие химические реакции, их все же относят к классу химических датчиков. Селективность химических резисторов определяется способом обработки полимеров. ППК широко применяются в качестве чувствительных элементов в составе более сложных измерительных устройств. Для обнаружения простых углеродсодержащих компонентов, таких как изопропиловый спирт, датчикам на основе ППК требуется пара секунд, а при детектировании более сложных масел это время возрастает до 10...15 секунд. Химические резисторы могут работать в течение нескольких месяцев, при условии, что не подвергаются действию коррозионных реагентов. Часто из ППК, по-разному обработанных, формируют матрицы для детектирования группы химических веществ. Химические резисторы могут отличить, например, уксусную кислоту от ацетона, но их не применяют для количественного определения концентрации реагентов. Серийно выпускаемые эластомерные детекторы часто используются для обнаружения таких газов как O_2, $C1_2$, H_2 и NO, т.е. газов, которые также могут детектироваться при помощи металл-оксидных датчиков. Но в отличие от металл-оксидных детекторов химические резисторы обладают меньшим потреблением энергии, и для работы им не требуются высокие температуры.

Для обнаружения жидкостных компонентов датчик должен реагировать на определенную концентрацию конкретного реагента. Это значит, что детектор должен обладать чувствительностью к физическим и/или химическим свойствам исследуемой жидкости. Примером такого датчика может служить резистивный детектор обнаружения утечек углеводородного топлива (первоначально такой детектор, разработанный в Bell Communication Research, применялся в системах защиты углубленных телефонных кабелей). Такой детектор изготавливается на основе кремния и композита на основе черного угля. Полимерная матрица выполняет роль чувствительного элемента, а проводящая прокладка используется для получения сравнительно низкого значения удельного сопротивления (порядка 10 Ом·см) в исходном состоянии. Такая структура является

чувствительной к растворителям с высоким коэффициентом взаимодействия между растворителем и полимером. Поскольку датчик не реагирует на полярные жидкости, такие как вода и спирт, его можно использовать в условиях работы под землей. Резистивный детектор изготавливается в виде тонкой пленки с высоким отношением площади поверхности к толщине. Когда искомый реагент вступает в контакт с пленочным чувствительным элементом, полимерный материал расширяется, что приводит к увеличению расстояния между проводящими частицами. Это означает, что композитная пленка из проводника превращается в диэлектрик с удельным сопротивлением 10^9 Ом·см и даже выше. Время реакции таких детекторов обычно меньше 1 с. Когда углеводородное топливо перестает воздействовать на пленку, она возвращается в свое исходное состояние.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виглеб Г. Датчики / Г. Виглеб : пер. с нем. – М. : Мир, 1989. – 196 с.
2. Буль Б.К. Электромеханические аппараты автоматики : учеб. пособ. для вузов / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов. – М. : Высш.шк., 1988. – 303 с.
3. Келим Ю.М. Электромеханические и электромагнитные элементы систем автоматики / Ю.М. Келим. –М. : Высш.шк., 1997. – 435 с.
4. Подлесный Н.И. Элементы систем автоматического управления и контроля / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Высш.шк. Главное изд-во, 1982. – 477 с.
5. Куликовский К.Л. Методы измерений / К.Л. Куликовский, В.Я. Купер. – К. : Высш.шк., 1989. – 345 с.
6. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи / Е.С. Полищук. – К. : Высш.шк. Главное изд-во, 1981. – 296 с.
7. Малов В.Н. Пьезоэлектрические датчики / В.Н. Малов. – М. : Высш.шк., 1995. – 356 с.
8. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин / А.М. Туричин, П.В. Новицкий и др.; под ред. П.В. Новицкого. – Л.: 1975. – 576 с.
9. Малов В.Н. Пьезоэлектрические датчики / В.Н. Малов. – М. : Высш.шк., 1995. – 356 с.
10. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин / Е.С. Левшина, П.В. Новицкий; под ред. П.В. Новицкого. – Л. : 1975. – 576 с.
11. Мащенко Т.Г. Датчики в биотехнических системах: учеб. пособ. / Т.Г. Мащенко. – Х. : НТУ «ХПИ» 2003. – 224 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
Лекция 1. Основы измерительных преобразований 4
Лекция 2. Резистивные преобразователи 13
Лекция 3. Емкостные датчики 27
Лекция 4. Индуктивные и трансформаторные датчики 37
Лекция 5. Индукционные датчики 49
Лекция 6. Пьезоэлектрические преобразователи 58
Лекция 7. Датчики на эффекте Холла 67
Лекция 8. Термопары 72
Лекция 9. Ультразвуковые датчики 78
Лекция 10. Газовые датчики 86
Лекция 11. Химические датчики 102
Список литературы 113

Навчальне видання

КОЛЕСНИК Юрій Ігоревич
ТОМАШЕВСЬКИЙ Роман Сергійович

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ ВИМІРЮВАННЯ ТА УЗГОДЖЕННЯ СИГНАЛІВ

Навчально-методичний посібник для студентів
спеціальності 7.05080202 «Електронні системи»
та 8.05080101 «Мікро - та наноелектронні прилади та пристрої».

Російською мовою

Роботу до видання рекомендував доц. В.В. Воінов

Відповідальний за випуск. С.Ю. Кривошеєв

В авторській редакції

План 2015 р., поз. 129
Підп. до друку 15.04.2016. Формат 60×84 1/16. Папір друк. № 2.
Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 6,7.
Наклад 100 пр. Зам № . Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

КОЛЕСНИК
Юрий Игоревич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Автор более 75 научных и учебно-методических работ, в том числе 4-х учебных пособий.

Специалист в области оптоэлектроники и микропроцессорного управления преобразователями электрической энергии.

Проводит занятия по следующим учебным дисциплинам: «Промышленная электроника», «Микропроцессорная техника», «Оптоэлектроника», «Квантовая электроника», «Электронные устройства измерения и согласования сигналов».

ТОМАШЕВСКИЙ
Роман Сергеевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная и биомедицинская электроника» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», заведующий лабораторией биомедицинской электроники.

Автор более 40 научных и учебно-методических работ.

Специалист в области систем измерения, медицинской диагностики и терапии, применения различных датчиков, в том числе медицинских. Проводит занятия по дисциплинам: «Электронное медицинское оборудование», «Датчики электрических величин», «Датчики электромагнитных величин», «Биофизика».